

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БЕРНИК Ірина Миколаївна

УДК 66.084.8:66.063.6

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ ОСНОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩ

Спеціальність 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології
Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ І.М. Берник

Науковий консультант: Луговський О.Ф., доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Берник І.М. Наукові основи вдосконалення технології і обладнання ультразвукової обробки дисперсних середовищ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці науково обґрунтованих методів вдосконалення технології і обладнання ультразвукової обробки дисперсних середовищ на основі синтезу досліджених умов взаємодії середовища і акустичного апарату та цілеспрямованого узгодження режимів і параметрів робочого процесу.

Ультразвукові кавітаційні технології унікальні та ефективні, використовуються для реалізації технологічних процесів хімічної промисловості та переробних виробництв.

Широке впровадження ультразвукової техніки та технології стримується низкою невирішених проблем. До цього часу відсутня загальноприйнята розрахункова модель процесу протікання стадій обробки. Технологічне середовище, як правило, представлено деякою приєднаною масою до поверхні випромінювання кавітаційного апарату. Зміна властивостей та параметрів технологічного середовища в процесі його обробки є доказаним фактом. Отже, такий підхід якщо і можна використати, то лише в рамках тих режимів та параметрів за яких були проведені дослідження.

Характерною особливістю, виконаних раніше, робіт є відсутність врахування взаємодії акустичного апарату та середовища. Такий підхід не дає повної картини процесу кавітаційної обробки, а також встановлення

розрахункової моделі для аргументованого визначення раціональних параметрів. Більшість запропонованих моделей відображають лінійні коливання бульбашки із сферичною поверхнею без урахування в'язкості. Зазвичай, резонансна частота визначається за застосування дискретної моделі для окремої бульбашки з подальшим штучним перенесенням на кавітаційний об'єм.

Одним із шляхів вирішення проблеми є створення моделі та її дослідження на основі представлення акустичного апарату і технологічного середовища єдиною структурованою системою за урахування їхньої взаємодії та взаємовпливу у часі і просторі. При цьому, така модель має відображати в рівняннях руху пружні, інерційні та дисипативні параметри, за врахування законів їх зміни як в акустичному апараті, так і в технологічному середовищі. Таким чином, узгодження характеристик системи «апарат – середовище», вдосконалення та розробка технології і обладнання ультразвукової обробки технологічних середовищ являється актуальним напрямком даних досліджень.

Результати дисертаційної роботи викладені в шести розділах.

В першому розділі розглянуто особливості застосування ультразвукових коливань для обробки технологічних середовищ. З'ясовано, що традиційні підходи дослідників базуються на уявленні проходження кавітаційного процесу, як певної послідовності етапів зародження, розвитку та сплескування бульбашки. Розрахункова модель технологічного середовища в процесі обробки трактується незмінною у часі. Разом з тим, очевидним є зміна параметрів технологічного середовища в процесі його обробки. Другою особливістю виконаних раніше робіт є роздільне дослідження динаміки акустичного апарату та руху середовища, як окремої системи. Таке припущення не дає повної картини процесу кавітаційної обробки з точки зору встановлення взаємовпливу апарата і середовища. Практично всі роботи, що були розглянуті в процесі оцінки їхніх переваг та недоліків, застосовують лінійні коливання бульбашки зі сферичною поверхнею без урахування в'язкості. Не зважаючи на ту обставину, що в останній час з'явилося ряд робіт

із намаганням врахування в'язкості, залишається невирішеною задача вдосконалення режимів і параметрів цього впливу.

Розглянуто існуючі моделі дисперсних систем та виконано оцінку методів підвищення ефективності енергетичних дій на технологічні середовища. Проведений огляд моделей засвідчив, що до цього часу відсутня загальноприйнята математична модель бульбашки та числові значення реологічних властивостей середовищ. Відмічені вище результати огляду та аналізу попередніх досліджень акустичної обробки технологічних середовищ і стали основою для визначення мети і задач досліджень.

Другий розділ присвячено визначенню методології та розробці методик досліджень параметрів взаємодії акустичного апарату та технологічних середовищ. Розроблено методологію досліджень за урахування зміни фізичних властивостей оброблюваного дисперсного середовища, якими є щільність, хвильовий опір, коефіцієнт поглинання. Основною передумовою визначення методик досліджень було прийняття уявлення технологічного середовища, як дисперсного. Ознаками оброблювальних середовищ прийнято: режим навантаження на випромінювач, фізичні характеристики та умови впливу на випромінювач. Так, за режимом навантаження на випромінювач середовища представляють собою акустично необмежені зі змінними реологічними параметрами; з постійними габаритами зі змінними реологічними параметрами; зі змінними габаритами, або мають змінні реологічні параметри. За фізичними характеристиками: рідкі; дисперсні; тверді. За умовами впливу на випромінювач: гармонійна (синусоїдальна) взаємодія та негармонійна (імпульсна) взаємодія.

Ефективність формування кавітаційної енергії визначається структурою та взаємодією основних елементів ультразвукової технологічної апаратури. Такими елементами є: електричний генератор; перетворювач електричних коливань в акустичні; випромінювач; технологічне середовище, як об'єкт обробки. Ефективність введення коливань від акустичного апарату в технологічне середовище залежить від ряду умов, що визначені в роботі.

Найбільш вагомим є ступінь використання введеної в оброблюване середовище акустичної енергії для протікання технологічного процесу. На такій основі прийнято математичну модель для досліджуваних середовищ.

В третьому розділі викладено результати дослідження складових реологічних характеристик різних технологічних середовищ в умовах акустичної кавітації. Визначення зміни реологічних властивостей технологічного середовища, якими є в'язкість, пластичність і пружність здійснено на основі використання залежності контактного тиску від зазначених параметрів. Дослідженням в'язко-пластичних властивостей технологічного середовища передувало здійснення оцінки законів зміни коефіцієнта динамічної в'язкості. Виявлено, що в'язкість середовища є важливим параметром, який впливає на утворення кавітаційних бульбашок, їх розвиток і на заключний етап технологічного процесу – стискування і сплескування. В'язкість впливає також на утворення та форму бульбашки. Проведено експериментальні дослідження інтенсивності ультразвукових коливань та амплітуди звукового тиску у відповідних точках вимірів технологічного середовища. Вимірювання конфігурації кавітаційної області та інтенсивності кавітаційних процесів здійснено за допомогою гідрофонів.

За результатами експериментів було визначено коефіцієнти згасання коливань у технологічних середовищах відмінними за реологічними властивостями. Виявлено, що дія в'язкості є суттєвою за малих значень амплітуд на початковій стадії утворення бульбашок, які мають невеликі радіуси. На бульбашки з великим початковим радіусом в'язкість впливає мало. Пояснюється це тим, що на початковій стадії бульбашки малого радіусу внаслідок дії в'язких сил стримуються в своєму збільшенні. Такий результат засвідчує, що процес утворення бульбашок є певною мірою спонтанним і потребує наявності змінного амплітудно-частотного спектру навантаження від акустичного апарату. Визначення пружних і інерційних властивостей технологічного середовища здійснено на встановлених значеннях швидкості розповсюдження хвиль. Виявлено, що швидкість звуку в технологічних газо-

рідинних середовищах залежить від співвідношення газової і рідинної компонент.

Експериментальні дослідження швидкості розповсюдження хвиль в технологічному середовищі здійснено за використання генератора імпульсів, випромінювача та трубки з технологічним середовищем. Отримані записи фіксувались на комп'ютері у вигляді віброграм для різних технологічних середовищ. Обробкою цих віброграм визначено числові значення швидкості розповсюдження хвиль.

Прийнято, що будь-який етап процесу кавітації представляє собою взаємодію кавітатора з середовищем із суттєвою зміною основних їхніх характеристик. Технологічне середовище за безпосередньої взаємодії з робочим органом ультразвукової коливальної системи, є її акустичним навантаженням. Зміну у часі властивостей середовища розглянуто, як нове джерело навантаження в будь-який момент зародження, розвитку та сплескування кавітаційних бульбашок. Таке середовище прямо впливає на параметри робочого процесу ультразвукового кавітатора.

Важливим параметром процесу є хвильовий опір середовища, який представляє добуток щільності і швидкості звуку в ньому. Виконаними дослідженнями отримано залежності для узгодження режимів і параметрів кавітаційного апарату та технологічного середовища. Узгодження здійснено шляхом встановлення спеціального компенсатора. Вибираючи значення вхідного опору компенсатора довжиною $\lambda/4$ забезпечено умову максимальної передачі за якою хвильовий опір апарату і компенсатора узгодженні.

Представлення середовища, як системи із розподіленими параметрами на основі хвильової теорії його руху та встановлення компенсатора забезпечить максимальну передачу енергії та отримати збільшення об'єму зони розвиненої кавітації на 35 – 45%. Знання властивостей дозволило не лише більш точно описати процес, а й визначити умови взаємодії середовища і кавітаційного апарату з метою вдосконалення параметрів і характеристик джерела енергії.

Четвертий розділ присвячено дослідженню та визначенню числових значень енергетичних параметрів процесу акустичної обробки різних за фізико-механічними властивостями та областей застосування рідинних середовищ. Енергія, що концентрується в контактній зоні «поверхня випромінювання кавітаційного апарату – середовище», є головним чинником забезпечення ефективного протікання робочого процесу. Особливою областю дослідження є визначення якісної та кількісної картини утворення енергії в зоні контакту кавітаційного апарату і технологічного середовища та умов передачі енергії до технологічного середовища. Під час кавітації щільність енергії звукового поля трансформується у високу щільність енергії всередині бульбашки, і навколо неї, яка з часом сплескується. За виникнення в дисперсному середовищі ультразвукової кавітації, її акустичні властивості істотно змінюються, що потребує зміни режиму і параметрів перенесення енергії від ультразвукового випромінювача в технологічне середовище. Енергетику віброакустичного процесу обробки технологічного середовища досліджено, як визначення та реалізація цілеспрямованого формування максимальної енергії безпосередньо в контактній зоні. За розгляду процесу обробки середовища, як хвильового, прийнято умову реалізації внутрішнього резонансу системи «кавітатор – середовище». Гармонізовано фазові коливання кавітаційного апарату і технологічного середовища. Здійснено дослідження енергії обробки технологічного середовища за умови гармонійної та імпульсної дії акустичного апарату. Виявлено, що під час кавітації щільність енергії звукового поля трансформується у високу щільність енергії всередині бульбашки. Обґрунтовано загальний підхід до визначення енергії процесу обробки технологічного середовища. Приведені аналітичні залежності для визначення енергії за гармонійним силовим навантаженням, які враховують процеси взаємодії акустичного апарату із технологічним середовищем. Отримано аналітичні залежності енергетичних критеріїв для оцінки процесів кавітаційної обробки технологічних середовищ. Залежність

враховує характер і якісну картину зміни узагальненої енергії на всьому етапі протікання кавітаційного процесу.

В п'ятому розділі приведено результати аналітичного дослідження зміни звукового тиску в контактній зоні та в будь-якій точці технологічного середовища за акустичної обробки. Дослідження ґрунтуються на науковій ідеї: математична модель є єдиною системою, що враховує фізико-механічні властивості та акустичні параметри середовища та обладнання. Реалізація наукової ідеї базується на робочій гіпотезі: домінуючим параметром формування та передачі раціонального рівня енергії за отримання найбільшого ефекту протікання технологічного процесу є контактний тиск. Розкрито якісну картину взаємодії кавітаційного апарату і технологічного середовища, визначено силову та енергетичну складові взаємовпливу між ними. Встановлено закони взаємодії технологічного середовища і кавітаційного апарату. Здійснено узгодження внутрішніх властивостей спільної системи «апарат – середовище». Визначено: тиск акустичного апарату в зоні контакту з середовищем (звуковий тиск); гідростатичний тиск; тиск в рідині; сили поверхневого натягу; сили в'язкого тертя; внутрішній тиск в кавітаційній бульбашці; тиск газів; тиск насиченого пару в рідині. Тиск акустичного апарату в зоні контакту з середовищем (звуковий тиск) і гідростатичний тиск представляють собою дію зовнішніх сил. Інші види тисків відносяться до внутрішніх реактивних дій і за своєю суттю представляють ті відповідні напруження в середовищі та в бульбашках кавітаційній області, що виникають внаслідок зовнішніх дій.

Послідовність протікання стадій виникнення бульбашок, їхній розвиток та сплескування є, як різною, так і одночасною. В роботі акцент сконцентрований на дослідженні стадії розвиненої кавітації ("стадія стабілізації – рівноваги параметрів кавітаційних бульбашок"), за якою слідує процес сплескування бульбашок кавітаційної області.

Результатом дослідження є час трансформації від початкового процесу (стадія зародження кавітації), вихідних параметрів акустичного

випромінювача і середовища (частота і амплітуда коливань, швидкість, щільність середовища та інші параметри) до кінцевих значень тих же параметрів (стадія рівноваги параметрів кавітації). І цей час протікання технологічного процесу є мінімальним за мінімальних витрат енергії. Складено рівняння руху системи «акустичний апарат – технологічне середовище» на основі дискретно-континуальної моделі. Отримано аналітичні залежності для визначення контактного тиску, амплітуд коливань та енергії на протікання технологічного процесу для гармонійного та імпульсного режимів навантаження. Визначено, що основу формул для визначення контактного тиску складають хвильові коефіцієнти. Досліджено характер зміни хвильових коефіцієнтів. При цьому один із коефіцієнтів не змінює свій знак на протязі всіх стадій процесу. Другий хвильовий коефіцієнт має ділянки з позитивними та з від'ємними значеннями. Такий характер зміни хвильових коефіцієнтів є важливим результатом впливу активних і реактивних складових тиску, що входять в загальну аналітичну залежність для визначення контактного тиску.

Дослідженнями підтверджено, що ключовим параметром еволюції газових і повітряних бульбашок в акустичному полі є звуковий тиск, який формується в контактній зоні системи «акустичний апарат – середовище». Саме встановлення якісної та кількісної картини зміни контактного тиску є домінуючим фактором обґрунтування та визначення раціональних параметрів інтенсифікації технологічного процесу обробки середовищ. Вперше доведено, що при виборі моделі оброблювального середовища необхідно враховувати окрім реактивної складової тиску і активну, яка характеризує дисипативні властивості середовища. Наявність резонансних зон відкриває можливість реального їх використання при оптимізації режимів і параметрів кавітаційного апарату, що дозволило інтенсифікувати процес обробки різних середовищ. Отримано залежності для розрахунку резонансу коливань акустичного апарату, який забезпечує зменшення витрат енергії на 50 – 70% та стійкий режим обробки дисперсних середовищ.

В шостому розділі приведено алгоритми та методики розрахунку раціональних режимів та параметрів ефективного протікання акустичної обробки технологічних процесів. Розроблено рекомендації щодо визначення режимів та параметрів обробки технологічних середовищ відмінних за фізико-механічними властивостями та областей їх застосування. Наведені дані про впровадження результатів досліджень в навчальний процес та виробництво.

Ключові слова: ультразвукова кавітація, дисперсні середовища, бульбашка, сплескування, взаємодія, реологічні та фізичні властивості, модель, критерії, режими, дискретні, континуальні, параметри.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Скоромна О. І., Разанова О. П., Поліщук Т. В., Шевчук Т. В., **Берник І.М.**, Паладійчук О. Р. Науково обґрунтовані заходи підвищення молочної продуктивності корів та покращання якості сировини в умовах виробництва. Монографія. Вінниця: ВНАУ, 2020. 174 с.
2. Луговський О.Ф., **Берник І.М.** Ультразвукові кавітаційні апарати для реалізації екологічно безпечної технології вилучення пектину із вторинної рослинної сировини. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія машинобудування. 2010, № 58. С. 82–86.
3. Луговський О.Ф., **Берник І.М.** Фізична модель ультразвукового кавітаційного вилучення пектину із вторинної рослинної сировини. *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2010, №1 (5) С. 25–30.
4. Луговський О.Ф., **Берник І.М.** Ультразвуковий кавітаційний екстрактор для рідинно-дисперсних середовищ. *Наукові праці ОНАХТ. Серія «Технічні науки»*. 2010, №37. С. 348–352.
5. **Берник І.М.**, Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В. Дослідження звукового поля та технологічних можливостей малоамплітудного

резонансного кавітатора при обробці рідинно-дисперсних середовищ. *Промислова гідравліка і пневмоавтоматика*. 2011, № 1 (31). С. 44–47.

6. **Берник І.М.**, Луговський О.Ф., Лобань Ю.М. Модель управління технологічним процесом ультразвукового кавітаційного вилучення пектину з рослинної сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011, №1 (61). С. 133–137.

7. **Берник І.М.**, Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В. Ультразвукова кавітаційна технологія для екстрагування рослинного матеріалу та обладнання для її реалізації. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011, №3 (63). С. 86–91.

8. Луговський О.Ф., **Берник І.М.** Виробництво пектинового концентрату з використанням ультразвукових кавітаційних технологій. Збірник наукових праць *Вінницького національного аграрного університету*. Серія «Технічні науки». 2011, Вип. 9. С. 159–163.

9. Луговський О.Ф., **Берник І.М.** Теоретичне обґрунтування доцільності використання ультразвукових кавітаційних технологій у технологічних процесах. *Техніка будівництва*. 2011, №26. С. 52–59.

10. Берник І.М. Основні засади проектування машин і обладнання переробних виробництв. *Теорія і практика будівництва*. 2011, №8. С. 6–9.

11. Луговская Е.А., Яхно О.М., **Берник И.Н.** Модель управления технологическим процессом ультразвуковой очистки эластических поверхностей. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Гірничо-електромеханічна*. 2012, Вип.23 (196). С. 154–166.

12. Берник І.М. Інтенсифікація технологічних процесів обробки харчових середовищ. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013, №3 (71). С. 109 –115.

13. Берник І.М. Аналіз параметрів впливу на формування моделі акустичної обробки рідинних харчових середовищ. *Наукові праці ОНАХТ. Серія «Технічні науки»*. 2014, Вип. 45 (2). С. 129–133.

14. Луговський О.Ф., **Берник І.М.** Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової

кавітаційної обробки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2014, №3 (75). С. 121–126.

15. Берник І.М. Дослідження параметрів кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ. *Техніка будівництва*. 2014, №32. С. 14 – 18.

16. Берник І.М. Енергетика кавітаційної обробки технологічного середовища. *Наукові праці ОНАХТ*. 2015, Том 1 (47). С. 87–90.

17. **Bernyk I.**, Luhovskyi O., Nazarenko I. Research staff process of interaction and technological environment in developed cavitation. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*. 2016, Вип. №1 (76). С. 12–19.

18. Bernyk I. Research parameters of ultrasound processing equipment dispersed in a technological environment. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016, Vol. 18. №3. p. 3–13.

19. Луговський О. Ф., **Берник І. М.** Аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітаційній області ультразвукового поля. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2016, №18. С. 10–15.

20. Bernyk I. Theoretical aspects of the formation and development of cavitation processes in technological environment. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2017, Vol.19. № 3. P. 5–13.

21. Берник І.М. Інтенсифікація процесу екстрагування рослинної сировини з використанням ультразвукової кавітації. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017, № 3(98). 69–73.

22. **Bernyk I.**, Luhovskyi O. Research and calculation of rational modes and parameters of an ultrasonic cavitator. *IX International Conference “Heavy Machinery-HM 2017”*. Zlatibor, 28 Jule. 1 July 2017, A. 109 – 112.

23. Берник І.М. Дослідження в'язкості дисперсних середовищ в умовах їхньої інтенсивної обробки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018, №1 (100). С. 62–67.

24. Bernyk I. Investigation of the processes of the acoustic apparatus with the processing technological environment power interaction. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018, Том 1. № 82. С. 72–80.
25. Luhovskyi O.F., Gryshko I.A., **Bernyk I.M.** Enhancing the Efficiency of Ultrasonic Wastewater Disinfection Technology. *Journal of Water Chemistry and Technology*. March 2018, Vol. 40. Is.2. P. 95–101.
26. **Bernyk I.**, Nazarenko I., Luhovskyi O. Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation. *Materials and technology*. 2018, № 4 (52). P. 465–468.
27. **Bernyk I.**, Nazarenko I., Luhovskyi O., Svidersky A. Researcher of the influence of low-frequency and high-frequency actions on processing of technological environments. *Eureka: Physics and Engineering*. 2018, №1. P. 73–86.
28. **Берник І.М.**, Кутняк М.М., Коц І.В. Віброекстрактори з гідроімпульсним приводом для застосування в робочих процесах систем «тверде тіло – рідина». *Продовольчі ресурси: зб. наук. пр.* 2019, №12 С. 16 – 24.
29. **Берник І.М.**, Коц І.В. Вибір алгоритму управління процесом барометричної обробки харчової сировини в тепловій камері з аеродинамічним нагріванням. *Продовольчі ресурси*. 2019, №13. С. 7–14.
30. Bernyk I. Research and Determination of Effective Parameters for Acoustic Technological Environment. *Тека*. 2019, Vol.19. №1. P. 65 – 77.
31. **Bernyk I.**, Luhovskyi O., Wojcik W., Shedreyeva I., Karnakova G. Theoretical Investigations of the Interaction of Acoustic Apparatus with Technological Environment Working Process. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019, №1(4). P. 32–37.
32. Берник І.М. Інноваційний підхід до одержання високоякісного молока-сировини. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2019, №3(106). С. 46–55.
33. Bernyk I. Estimation of efficiency of ultrasonic cavitation processing of technological media on energy criteria. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020, №2 (89). С. 18–28.

34. **Берник І.М.**, Коц І.В., Бауман К.В. Гідродинамічна установка для приготування жирових емульсій. *Продовольчі ресурси. Збірник наукових праць*. 2020, № 14. С. 29–34.

35. Luhovskyi O., **Bernyk I.**, Gryshko I., Abdulina D., Zilinskyi A. Mobile Equipment for Ultrasonic Cavitation Inactivation of Microorganisms in the Liquid Environment. In: Stryczek J., Warzyńska U. (eds) *Advances in Hydraulic and Pneumatic Drives and Control 2020*, P. 272-281. NSHP 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8_24.

36. Nazarenko I., Dedov O., **Bernyk I.**, Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Determination of stability of models and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, Vol. 6. №7 (108). P. 71–79.

37. Луговський О. Ф., Зілінський А. І., Шульга А. В., Лавріненков А.Д., Гришко І. А., **Берник І. М.** Експериментальне дослідження стійкості конструкційних матеріалів до кавітаційної ерозії. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020, №3 (90). С. 29–33.

38. Патент на корисну модель № 201809320. Спосіб підготовки води в басейнах для плавання із застосуванням ультразвуку. Луговський О. Ф., **Берник І.М.**, Гришко І. А., Зілінський А. І., Луговська К. О., Храменков О. В. заявл. 12.09.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.

39. Патент на корисну модель №137288. Спосіб ультразвукової кавітаційної інактивації мікрофлори рідинних технологічних середовищ. Берник І.М. заявл. 72.04.2019; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19.

40. Патент на корисну модель № 144597. Мобільний ультразвуковий пристрій для обробки рідини. Луговський О. Ф., **Берник І.М.**, Мовчанюк А.В., Гришко І. А., Луговська К.О., Зілінський А.І., Шульга А.В. заявл. 18.05.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 19.

41. Луговський О.Ф., **Берник І.М.** Перспективи використання енергоощадних методів обробки харчових середовищ. Матеріали XVII

Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Черкаси, 17–20 квітня 2012. С. 49.

42. Луговський О.Ф., **Берник І.М.** Підвищення якості молочної продукції за рахунок застосування явища ультразвукової кавітації. Тези доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка та технологія». Севастополь, 11–15 червня 2012. С. 44.

43. **Берник І.М.**, Луговський О.Ф. Моделювання характеристик харчового середовища в акустичному полі навантаження. Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Кіровоград, 21–24 травня 2014 р. С. 59–60.

44. Луговской А.Ф., Мовчанюк А.В., **Берник И.Н.**, Гришко И.А. Ультразвуковые кавитационные стерилизаторы жидких сред. Матеріали першої науково-практичної конференції біомедичних інженерів і технологів України «Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії і медичної промисловості України». Київ, 7–8 жовтня 2015 р. С. 31.

45. **Берник І.М.**, Луговський О.Ф. Енергетика кавітаційної області. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ НТУУ «КПІ». 25–29 травня 2015 р. С. 50.

46. Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., **Берник І.М.** Ультразвукова кавітація в сучасних технологіях. Матеріали МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 21 – 24 червня 2016 р. м. Одеса – м. Київ. С. 132.

47. Луговской А.Ф., Мовчанюк А.В., **Берник И.Н.**, Гришко И.А. Повышение эффективности технологических процессов с помощью ультразвуковой кавитации. Тези доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідравліка і пневматика». Харків, 19 – 21 жовтня 2016. С. 33–34.

48. **Берник І.М.**, Луговський О.Ф. Фізичні аспекти послідовності досліджень кавітаційного процесу. Матеріали XXII Міжнародної науково-

технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Черкаси. 23–26 травня 2017 р. С. 32 – 33.

49. **Берник І.М.**, Луговський О.Ф. Синергетика стадій кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ. Тези доповідей XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідравліка і пневматика». Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 23–24.

50. **Берник І.М.**, Луговський О.Ф. Ексергія ультразвукової обробки технологічних середовищ. Тези доповідей Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України». Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 131.

51. Берник І. М. Дослідження робочого процесу взаємодії акустичного апарату із технологічним середовищем. «Вібрації в техніці та технологіях» XVI Міжнародна науково-технічна конференція 26–27 жовтня 2017 р.: збірник тез доповідей. Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 47 – 48.

52. Луговський О.Ф., **Берник І.М.** Аспекти ультразвукових технологій в харчовій промисловості. Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційний розвиток харчової індустрії». Київ: ІПР, 2017. С. 135-136.

53. Берник І.М. Теоретичні аспекти моделювання та визначення режимів і параметрів акустичної обробки технологічних середовищ. Матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ НТУУ «КПІ». 19–22 червня 2018 р. С. 96 – 98.

54. Берник І.М. Встановлення раціонального рівня енергії та оптимальних параметрів ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ. Збірник тез доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції “Вібрації в техніці та технологіях” НУ «Львівська політехніка». Львів, 2018 р. С. 47–48.

55. Берник І.М. Врахування зміни властивостей технологічного середовища в процесі ультразвукової обробки на встановлення ефективних

параметрів. Збірник тез доповідей I-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту». Вінниця ВНТУ, 13-15 травня 2019 року. С. 231–232.

56. Берник І.М. Дослідження коефіцієнта згасання ультразвуку в кавітуючому рідинному середовищі. Матеріали XXIV Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ НТУУ «КПІ», 27–30 травня 2019 р. С. 89 – 90.

57. Берник І.М. Визначення та дослідження енергії ультразвукових коливань за гармонійним та імпульсним законами навантаження на технологічне середовище Матеріали XVIII Міжнародної науково-технічної конференції Вібрації в техніці та технологіях, 23-25 жовтня 2019 р. К.: КНУБА, 2019. С. 129–132.

58. Берник І.М. Критерії оцінки кавітаційної обробки технологічних середовищ. XXV Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ, 6 – 9 жовтня 2020 р.: Матеріали конференції. Київ, 2020. С. 326 – 328.

ANNOTATION

Bernyk I.M. Scientific basis for improving the technology and equipment for ultrasonic treatment of dispersed environments. – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Thesis for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences, speciality 05.17.08 – processes and the equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine of Ukraine, Kyiv, 2021.

Thesis is devoted to the solution of the actual scientific and applied issue consisting in the development of scientifically substantiated methods of improvement of dispersed environment ultrasonic processing technology and equipment on the basis of synthesis of researched conditions of environment and acoustic device.

Ultrasonic cavitation technologies are unique and effective, they are used to implement technological processes of the chemical and processing industries.

The widespread introduction of ultrasound equipment and technology is limited by a number of unresolved issues. Nowadays, there is no generally accepted calculation model of the processing stages process. The technological environment is usually represented by some mass attached to the surface of the cavitation apparatus radiation. The change in the technological environment properties and parameters during its processing is a proven fact. Thus, this approach can be used within the regimes and parameters under which the research was conducted.

A characteristic feature of earlier researches is the lack of consideration of the acoustic apparatus and the environment interaction. This approach does not give a complete picture of the process of cavitation processing. Most of the proposed models reflect the linear oscillations of the bubble with a spherical surface without taking into account the viscosity. The resonant frequency is usually determined using a discrete model for a single bubble followed by artificial transfer to the cavitation volume.

To create a model and research it representing as the acoustic apparatus and technological environment as a single structured system, taking into account their interaction is one of the ways to solve the problem. Such a model should reflect elastic, inertial and dissipative parameters in the motion equations taking into account the laws of their change in both the acoustic apparatus and the technological environment. Thus, the coordination of the characteristics of the apparatus – environment system, improvement and development of technology and equipment for ultrasonic processing of technological environments is an important area of research.

The thesis results are presented in six units.

The first unit considers the peculiarities of the ultrasonic vibration application for the technological environment processing. It has been found that the traditional research approaches are based on the concept of the cavitation process, as a sequence of stages of origin, development and flattening of the bubble. The calculated model

of the technological environment is interpreted as constant over time. However, it is obvious that technological environment parameters have been changed during its processing. The previous research second peculiarity is a separate research of the acoustic apparatus dynamics and the environment movement as a separate system. This assumption does not give a complete picture of cavitation processing in terms of establishing apparatus and environment interaction. The studies considered in the process of evaluating their advantages and disadvantages using linear oscillations of a bubble with a spherical surface without taking into account the viscosity. Despite the fact that a lot of works have recently appeared with an attempt to take into account the viscosity, the task of improving the modes and parameters of this effect remains unsolved.

The dispersed system existing models are considered and the methods increasing of efficiency of power actions on technological environments estimation has been conducted. The models review proved that there is still no generally accepted mathematical model of the bubble and numerical values of the rheological properties of the environment. The review and analysis of researches on technological environment acoustic processing have been taken into account having become the basis for determining the purpose and objectives of research.

The second unit is devoted to the research methodology for the interaction parameters of the acoustic apparatus and technological environments. The research methodology is developed taking into account the change of physical properties of the processed dispersed environment, i.e. density, wave resistance, and absorption coefficient. The main prerequisite for defining research methods was to accept the idea of the technological environment as dispersed. The processing environment characteristics are the mode of loading on the radiator, physical characteristics and conditions of influence on the radiator. Thus, according to the mode of loading on the emitter, the environments are acoustically unlimited with variable rheological parameters; with constant dimensions with variable rheological parameters; with variable dimensions, or have variable rheological parameters. They are liquid, dispersed, solid by physical characteristics. The harmonic (sinusoidal) interaction

and nonharmonic (impulse) interaction are distinguished considering affecting conditions.

The cavitation energy formation efficiency is determined by the structure and interaction of the main elements of ultrasonic technological equipment, i.e. electric generator, converter of electric oscillations into acoustic, oscillator, and technological environment as an object of processing. The efficiency of the introduction of oscillations from the acoustic apparatus into the technological environment depends on a number of conditions defined in the work. The degree of the acoustic energy application introduced into the treated technological process environment is the most important. The mathematical model for the researched environments is adopted.

The third unit contains the results of the rheological characteristics components of different technological environments under conditions of acoustic cavitation. Determination of changes in the rheological properties of the technological environment, which are viscosity, ductility and elasticity is based on the use of the contact pressure dependence on these parameters. The study of the viscoplastic properties of the technological environment was preceded by an assessment of the laws of change of the dynamic viscosity coefficient. It was found that the viscosity of the environment is an important parameter affecting the cavitation bubbles formation, their development and the final stage of the technological process, i.e. compression and flattening. Viscosity also affects the formation and shape of bubbles. Experimental studies of the ultrasonic oscillation intensity and the sound pressure amplitude at the respective measurement points of the technological environment have been carried out. Measurements of the configuration of the cavitation area and the intensity of cavitation processes were performed using hydrophones.

According to the experiment results, the attenuation coefficients of oscillations in technological environment with different rheological properties were determined. It was found that the effect of viscosity is significant at small values of amplitudes at the initial stage of formation of bubbles with small radii. Bubbles with

a large initial radius have little effect on viscosity. This is due to the fact that in the initial stage, the bubbles of small radius are restrained in their increase due to the action of viscous forces. This result indicates that the process of bubble formation is to some extent spontaneous and requires the presence of a variable amplitude-frequency spectrum of the load from the acoustic apparatus. Determination of the elastic and inertial properties of the technological environment is carried out on the established values of the speed of wave propagation. It is found that the sound speed in technological gas-liquid environment depends on the ratio of gas and liquid components.

Experimental researches of wave propagation speed in the technological environment were performed using a pulse generator, an emitter and a tube with a technological environment. The recordings were recorded on personal computer in the form of vibrograms for various technological environments. The numerical values of the wave propagation velocity were determined by processing these vibrograms.

Any stage of the cavitation process is the interaction of the cavitator with the environment with a significant change in their basic characteristics. The technological environment in direct interaction with the working body of the ultrasonic oscillating system is its acoustic load. The change in time properties of the environment is considered as a new source of load at any time of origin, development and flattening of cavitation bubbles. This environment directly affects on the operating parameters of the ultrasonic cavitator.

The environment impedance is an important parameter of the process. We obtained dependences for modes and parameters coordination of cavitation apparatus and technological environment. It was made by installing a special compensator. The input resistance of the compensator length $\lambda/4$ provides the condition of maximum transmission at which the impedance of the apparatus and the compensator are matched.

Environment as a system with distributed parameters based on the wave motion theory and the compensator installation will ensure maximum energy

transfer and increase the volume of the developed cavitation zone by 35–45%. Studying properties allowed to describe the process more accurately and to determine the conditions of interaction between the environment and the cavitation apparatus in order to improve the parameters and characteristics of the energy source.

The fourth unit is devoted to the research and determination of energy parameters numerical values of acoustic treatment by different physical and mechanical properties and areas of liquid environment application. The energy concentrated in the contact zone the surface of the cavitation apparatus radiation – environment is the main factor ensuring the efficient operation of the work process. A special area of research is to determine the qualitative and quantitative peculiarities of energy formation in the contact zone of the cavitation apparatus and the technological environment and the conditions of energy transfer to the technological environment. The energy density of the sound field is transformed into a high energy density inside the bubble, and around it, which flattens over time. Its acoustic properties change significantly in the dispersed environment requiring a change in the mode and parameters of energy transfer from the ultrasonic emitter to the technological environment.

The energy of the vibroacoustic technological environment processing is investigated as the determining and implementation of purposeful formation of maximum energy directly in the contact zone. Considering the processing of technological environment as a wave one, the condition of realization of the internal resonance of the system cavitator – environment is accepted. The phase oscillations of the cavitation apparatus and the technological environment are harmonized. The study of the processing energy of the technological environment under the condition of harmonic and impulse action of the acoustic device is carried out. It was found that the energy density of the sound field is transformed into a high energy density inside the bubble during cavitation. The general approach to determining the technological environment energy is substantiated. Analytical dependences energy for determination by harmonic power loading which consider processes of

interaction of the acoustic device with technological environment are resulted. Analytical dependences of energy criteria for estimation of processes of cavitation processing of technological environments are received. Dependence takes into account the nature and quality of the change in generalized energy throughout the stage of the cavitation process.

The fifth unit presents the results of an analytical research of the change in sound pressure in the contact zone and at any point of the technological environment during acoustic processing. The research is based on a scientific idea, i.e. a mathematical model is the only system taking into account the physical and mechanical properties and acoustic parameters of the environment and equipment. The implementation of the scientific idea is based on the working hypothesis, i.e. the dominant parameter of the formation and transmission of a rational level of energy to obtain the greatest effect of the technological process is the contact pressure. A qualitative picture of the interaction of the cavitation apparatus and the technological environment is revealed, the power and energy components of the interaction between them are determined. The interaction of the technological environment and the cavitation apparatus are established. The internal properties of the joint system apparatus – environment were coordinated. The pressure of the acoustic device in the area of contact with the environment (sound pressure); hydrostatic pressure; fluid pressure; surface tension forces; viscous friction forces; internal pressure in the cavitation bubble; gas pressure; saturated vapor pressure in the liquid were determined. The pressure of the acoustic apparatus in the area of contact with the environment (sound pressure) and hydrostatic pressure are the action of external forces. Other types of pressures are internal reactive actions representing the corresponding stresses in the environment and in the bubbles of the cavitation region that arise as a result of external actions.

The sequence of bubbles stages, their development and flattening are both different and simultaneous. We have studied the stages of developed cavitation (stabilization stage – equilibrium of cavitation bubble parameters), which is followed by the process of flattening of cavitation bubbles.

The research result is the transformation time from the initial process (stage of cavitation origin), the initial parameters of the acoustic emitter and environment (frequency and amplitude of oscillations, speed, medium density and other parameters) to the final values of the same parameters (equilibrium stage of cavitation parameters). The technological process is minimal with minimal energy consumption. The motion equation of the acoustic apparatus – technological environment system on the basis of discrete-continuous model is made. Analytical dependences for determination of contact pressure, amplitudes of oscillations and energy on the course of technological process for harmonic and pulse load modes are obtained. It is determined that the basis of the formulas for determining the contact pressure are wave coefficients. The nature of the change of wave coefficients is investigated. None coefficient changes during all stages of the process. The second wave coefficient has areas with positive and negative values. This nature of the change in wave coefficients is an important result of the influence of active and reactive components of pressure, which are included in the general analytical dependence for determining the contact pressure.

Studies have confirmed that sound pressure is the key parameter in the evolution of gas and air bubbles in the acoustic field, it is formed in the contact zone of the acoustic apparatus – environment system. The qualitative and quantitative change in contact pressure is the dominant factor in substantiating and determining the rational parameters of the intensification of the technological process of environmental treatment. It has been proved for the first time that choosing a model of the treatment environment it is necessary to take into account the reactive pressure component and the active one characterizing the dissipative properties of the environment. The presence of resonant zones opens the possibility of their actual use in optimizing the modes and parameters of the cavitation apparatus allowing to intensify the processing of different environments. The dependences for the calculation of the vibration resonance of the acoustic apparatus are obtained, which provides a reduction of energy consumption by 50–70% and a stable mode of dispersed environments processing.

The sixth unit presents algorithms and methods for calculating rational modes and parameters of effective acoustic processing of technological environment. Recommendations for the modes and parameters determining technological environments different in physical and mechanical properties and areas of their application have been developed. Data on the research results implementation in the educational and production process are given.

Keywords: ultrasonic processing, cavitation, dispersed environment, bubble, flattening, interaction, rheological and physical properties, model, criteria, modes, discrete, continuous, parameters.

ЗМІСТ

Вступ	31
1. СТАН ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
1.1. Область застосування та фізичні аспекти кавітаційної технології обробки різних середовищ	38
1.2 Класифікаційні ознаки оброблювальних середовищ	45
1.3 Аналіз існуючих реологічних моделей дисперсних систем	59
1.4 Оцінка існуючих аналітичних залежностей для визначення режимів кавітаційного процесу	75
1.5 Огляд та оцінка конструктивних та технологічних параметрів акустичних апаратів	81
1.6 Постановка задач досліджень	100
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ПАРАМЕТРІВ АКУСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ	102
2.1 Методи обробки технологічних середовищ та фізична сутність їх механізмів	102
2.2 Методологічні аспекти визначення основних класифікаційних ознак оброблювальних середовищ	106
2.3 Методика визначення функціональних залежностей між акустичними параметрами кавітаційного апарату та реологічними властивостями оброблювальних технологічних середовищ	109
2.4 Методологія та алгоритм дослідження опору технологічного середовища на рух акустичного апарату	118
2.5 Методи вимірювання та контролю параметрів робочого процесу акустичної кавітаційної обробки робочих середовищ	122
2.5.1 Оцінка методів вимірювання акустичних хвиль при кавітаційній обробці робочих середовищ	124

2.5.2 Аналітичні та експериментальні методики визначення параметрів та контролю процесів кавітаційної обробки технологічних середовищ	135
2.6 Оцінка та обґрунтування вибору методів дослідження процесів та параметрів акустичної обробки технологічних середовищ	149
2.7 Висновки по розділу	151
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ НА УТВОРЕННЯ І РОЗВИТОК КАВІТАЦІЙНОЇ ОБЛАСТІ	153
3.1 Передумови та припущення	153
3.2 Дослідження ступені впливу в'язко-пластичних та пружних властивостей технологічного середовища на параметри кавітаційного процесу	157
3.2.1 Аналітичні залежності визначення в'язкості за різних гіпотез зміни їхніх властивостей	157
3.2.2. Аналітичні залежності для визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітуючому середовищі	166
3.2.3 Обґрунтування та вибір методу експериментального дослідження в'язких та пружних властивостей технологічного середовища	170
3.3 Результати досліджень в'язких та пружних характеристик і параметрів обробки технологічного середовища в режимі зародження і розвитку кавітаційного процесу	178
3.3.1 Результати досліджень в'язких характеристик технологічних середовищ	178
3.3.2 Результати досліджень пружно-інерційних характеристик технологічних середовищ	183
3.4 Дослідження впливу хвильового опору середовища на дію акустичного апарату	188

3.5 Висновки по розділу	193
РОЗДІЛ 4. ЕНЕРГЕТИКА КАВІТАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ	
ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ	195
4.1 Загальний підхід до оцінки складових енергії акустичної обробки технологічного середовища	195
4.2. Дослідження енергії обробки технологічного середовища за умови гармонійної дії акустичного апарату	206
4.2.1. Аналітичне визначення енергії за гармонійним силовим навантаженням	206
4.2.2. Результати та аналіз дослідження енергії обробки технологічного середовища за умови гармонійної дії акустичного апарату	209
4.3 Дослідження енергетики процесу обробки технологічного середовища імпульсним навантаженням	210
4.3.1 Основні аспекти визначення ефективності імпульсного методу обробки технологічних середовищ	210
4.3.2. Аналітичне визначення енергії для обробки технологічного середовища за умов імпульсного навантаження	213
4.4. Обґрунтування та вибір енергетичних критеріїв оцінки процесів кавітаційної обробки технологічних середовищ	216
4.4.1. Загальні критерії оцінки кавітаційних апаратів для обробки технологічних середовищ	216
4.4.2. Визначення енергетичних критеріїв для оцінки кавітаційної обробки технологічних середовищ	220
4.5.Висновки по розділу	226
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СИСТЕМИ	
«КАВІТАТОР - ТЕХНОЛОГІЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ» НА ОСНОВІ	
СТАДІЙНОГО ВРАХУВАННЯ ДИСКРЕТНОЇ І	227
КОНТИНУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ	
5.1 Передумови та припущення	227

5.2 Застосування корпускулярної теорії для опису переміщення бульбашки в кавітаційному середовищі	230
5.2.1 Схема вільного руху одинокої бульбашки	230
5.2.2 Схема руху одинокої бульбашки в полі врахування дії сил опору	233
5.3 Застосування континуальної теорії для опису руху бульбашок за розташування поверхні випромінювання акустичного апарата під оброблювальним технологічним середовищем	238
5.4 Застосування континуальної теорії для опису руху бульбашок за розташування поверхні випромінювання акустичного апарата над оброблювальним технологічним середовищем	249
5.5 Результати теоретичних досліджень та їх аналіз	259
5.5.1 Визначення впливу складових тиску на рух і зміну стану бульбашки на різних стадіях протікання кавітаційного процесу	259
5.5.2 Результати комп'ютерного дослідження параметрів кавітаційного процесу та їх аналіз	265
5.6 Висновки по розділу	277
РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	279
6.1 Вихідні положення створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище»	279
6.2 Граничні значення акустичних параметрів	291
6.3 Аналіз результатів встановлення зміни параметрів акустичного процесу обробки технологічних середовищ	298
6.4. Методика визначення власної та резонансної частоти коливань бульбашки та кавітаційної області	305
6.4.1 Дискретна модель	306
6.4.2. Континуальна модель	311

6.5. Методики та алгоритми визначення параметрів робочого процесу обробки технологічних середовищ	314
6.5.1. Алгоритми визначення параметрів	314
6.5.2. Методика використання алгоритмів	318
6.7. Висновки по розділу	337
ВИСНОВКИ	339
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	342
ДОДАТОК А Програма розрахунку параметрів та режимів кавітаційного процесу	378
ДОДАТОК Б Приклади розрахунків параметрів та режимів на різних стадіях кавітаційного процесу в MATLAB	406
ДОДАТОК В Програма розрахунку хвильових коефіцієнтів	419
ДОДАТОК Г Документи, що підтверджують впровадження результатів роботи	425

ВСТУП

Актуальність роботи. Ультразвукові кавітаційні технології унікальні та ефективні, використовуються для реалізації технологічних процесів хімічної промисловості та переробних виробництв.

Широке впровадження ультразвукової техніки та технології стримується низкою нерозв'язаних проблем. Дотепер немає загальноприйнятої розрахункової моделі процесу проходження стадій обробки. Технологічне середовище, як правило, представлено деякою приєднаною масою до поверхні випромінювання кавітаційного апарату. Зміна властивостей та параметрів технологічного середовища під час його обробки є доведеним фактом. Отже, такий підхід, якщо і можна використати, то лише в рамках тих режимів та параметрів, у яких були проведені дослідження. У виконаних раніше роботах не враховано взаємодію акустичного апарата та середовища, що не відображає повної картини процесу кавітаційної обробки, а також встановлення розрахункової моделі для аргументованого визначення раціональних параметрів. Більшість запропонованих моделей відображають лінійні коливання бульбашки зі сферичною поверхнею без урахування в'язкості. Зазвичай, резонансна частота визначається завдяки застосуванню дискретної моделі для окремої бульбашки з подальшим штучним перенесенням на кавітаційний об'єм.

Одним із шляхів розв'язання проблеми є створення моделі та дослідження її на основі представлення акустичного апарата і технологічного середовища єдиною структурованою системою, з урахуванням їхньої взаємодії та взаємовпливу у часі і просторі. При цьому, така модель має відображати у рівняннях руху пружні, інерційні та дисипативні параметри, за врахування законів їх зміни як в акустичному апараті, так і в технологічному середовищі.

Таким чином, узгодження характеристик системи «апарат – середовище», вдосконалення та розробка технології і обладнання

ультразвукової обробки технологічних середовищ є актуальним напрямом досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до тематики держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка гідравлічних мехатронних систем машинобудування з високими показниками ефективності і надійності» (2015 – 2016 р.р., № ДР 0115U000397, автор – виконавець теми); «Створення високоефективних виконавчих пристроїв до адаптивних систем автоматизації з відкритою архітектурою» (2017 – 2018 р.р., № ДР 0117U004337, автор – виконавець теми).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у розробці наукових основ вдосконалення процесів ультразвукової обробки шляхом синтезу параметрів взаємодії обладнання і дисперсного середовища, забезпечення раціональних режимів та параметрів за мінімальної енергоємності.

Для досягнення означеної мети в роботі сформульовані такі задачі:

- здійснити аналіз технологій та обладнання акустичної обробки рідинних дисперсних середовищ хімічної технології та переробних виробництв;
- розробити методологію та методи дослідження реологічних властивостей рідинних дисперсних середовищ та ступеня їх впливу на спільний рух системи «кавітаційний апарат – середовище»;
- виконати аналітичні дослідження впливу реологічних властивостей технологічних середовищ на утворення і розвиток кавітаційної області;
- дослідити енергетику стадій кавітаційного процесу акустичної обробки технологічних середовищ;
- здійснити аналітичні та експериментальні дослідження руху системи «кавітаційний апарат – середовище» на основі застосування дискретних і

континуальних моделей та поетапного врахування стадій утворення, розвитку і сплескування бульбашок кавітаційної області;

– розробити алгоритми та методики визначення раціональних режимів і параметрів кавітаційної обробки рідинних дисперсних технологічних середовищ;

– провести оцінку ефективності результатів досліджень та їх практичного використання.

Об'єкт дослідження – робочі процеси ультразвукової кавітаційної обробки рідинних дисперсних технологічних середовищ.

Предмет дослідження – режими та параметри ультразвукової кавітаційної обробки рідинних дисперсних середовищ.

Методи дослідження. Розробка методології і методів математичного та експериментального дослідження реологічних властивостей дисперсних середовищ обґрунтована застосуванням загальноприйнятих досягнень фізико-хімічної механіки, аналізу і синтезу, системного підходу. Методи аналітичного дослідження руху системи «кавітаційний апарат – середовище» базуються на використанні класичних положень теорії механічних коливань і суцільних середовищ. Алгоритми та методики визначення режимів і параметрів розроблені на основі методів аналітичного та експериментального встановлення ефективного проходження досліджуваних процесів. Врахування стадій обробки різних технологічних середовищ є умовою створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище». Базою отриманих практичних результатів було використання вдосконалених та розроблених нових критеріїв, синтезуючих параметри дискретних і розподілених моделей за законами частотнозалежного та частотнонезалежного розсіяння енергії.

Наукова ідея роботи полягає у вдосконаленні технологій та ультразвукового обладнання шляхом визначення і спільного використання внутрішніх властивостей оброблювальних середовищ і робочого обладнання, як єдиної акустичної системи. Гармонізація активних і реактивних сил такої

акустичної системи є необхідною процедурою отримання максимальної енергії ефективного кавітаційного процесу.

Наукова новизна. У роботі вирішена важлива наукова проблема розкриття фізичної сутності процесів взаємодії ультразвукового обладнання та оброблювальних дисперсних середовищ і встановлення на цій основі законів руху досліджуваних систем.

Уперше:

- розроблено математичну розрахункову модель технологічного середовища, відмінного за своїм складом і методом обробки, з урахуванням стадій перебігу кавітаційного процесу;

- встановлено закономірності руху дискретно-континуальних систем у режимі розвиненої кавітаційної обробки технологічних середовищ з метою забезпечення високої продуктивності та мінімізації енерговитрат;

- отримано аналітичні залежності для визначення тиску в системі «поверхня випромінювання акустичного апарата – середовище» та максимального об'єму області розвиненої кавітації;

- отримано аналітичні залежності визначення необхідного рівня енергії обробки технологічних середовищ за врахування зміни їх реологічних властивостей;

вдосконалено:

- параметри та режими акустичного випромінювача із врахуванням зміни реологічних властивостей середовища на основі структурних та феноменологічних моделей досліджуваних систем;

набули подальшого розвитку:

- методи дослідження ультразвукових кавітаційних технологій.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені алгоритми та методики розрахунків параметрів і режимів ефективною обробки різних за складом та реологічними властивостями технологічних середовищ. Отримано підвищення ефективності проходження процесів хімічних технологій шляхом застосування встановлених раціональних режимів, параметрів, що

забезпечують формування кавітаційної області максимального об'єму в гетерогенних середовищах із різними реологічними властивостями. Врахування умов розповсюдження хвиль на основі континуальної моделі рідинного середовища із реалізацією визначених параметрів забезпечує збільшення об'єму зони розвинутої кавітації на 35–45 %. Реалізація резонансного режиму за отриманими формулами уможливила збільшення амплітуди коливань у 7–8 разів, зменшення витрати енергії на 50–70 %, стійкий робочий режим акустичного апарату.

Створено передумови для розробки кавітаційних апаратів із змінними параметрами робочого процесу за програмою забезпечення максимального ефекту акустичної обробки технологічного середовища.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі під час виконання практичних та лабораторних робіт на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Промислове впровадження наукової розробки на ТОВ «Агрохім Групп» у технологічному процесі виробництва гумінових добрив. Науково-технічна розробка «Ультразвуковий кавітаційний знезаражувач – гомогенізатор – дегазатор» на підприємстві ООО «Компанія «Джала Голд» у технологічному процесі виробництва рідких азотних та комплексних добрив. Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення впроваджено у виробництво «ТОВ Ашер 8». Впровадження наукових розробок на ПАТ «Дрогобицький завод автомобільних кранів» (м. Дрогобич Львівської області), ТОВ «Люстдорф» (м. Іллінці Вінницької області) та ПП «Кондитерський дім «Санкруа» (м. Вінниця).

Запропоновано методики дослідження взаємовпливу параметрів акустичного випромінювача енергії і властивостей рідинних дисперсних середовищ хімічної промисловості на основі структурних та феноменологічних моделей досліджуваних систем можуть бути використані і

в інших галузях.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто здійснено наукове обґрунтування для системного комплексного дослідження взаємодії акустичного апарата та оброблювального дисперсного середовища, що дало змогу встановити закономірності руху дискретно-континуальних систем для забезпечення високої продуктивності з мінімізацією енерговитрат, розв'язувати проблеми встановлення раціональних технологічних режимів та створення передумов керування роботою акустичних перетворювачів. У наступних роботах викладені основні результати дисертаційної роботи, які отримані та опубліковані автором самостійно [10, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 21, 23, 24, 30, 32, 33, 39, 51, 53–58].

Особистий внесок здобувача у спільних друкованих працях: розроблення технології та визначення ефективності знезараження за використання ультразвукової кавітації [1, 25]; розроблення фізичної моделі та кавітаційного обладнання для рідинно-дисперсних середовищ [2–4]; моделювання кавітаційних процесів обробки дисперсних середовищ [5–9, 48, 49]; оцінка технологічного процесу ультразвукового очищення поверхонь [11]; дослідження параметрів та встановлення залежності впливу середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки [14, 17]; аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль у середовищі [19]; дослідження аналітичних залежностей для визначення взаємодії акустичного апарата із середовищем [27]; вибір конструктивних параметрів моделі для дослідження вібраційних та акустичних систем [28, 34]; розроблення математичної моделі [26, 31]; розрахунок акустичної системи ультразвукового апарата для інактивації мікроорганізмів у рідкому середовищі [35]; дослідження використання ультразвукових технологій та обладнання для інтенсифікації технологічних процесів [41–50, 52]; у патентах на корисні моделі авторові належить розробка загальних ідей й участь у формулюванні технічних рішень [38, 40].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної

роботи висвітлені та обговорені на: Міжнародних науково-технічних конференціях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (Черкаси, 2012; Київ, 2015, 2016, 2018, 2019, 2020); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка та технологія» (Севастополь, 2012); Міжнародних науково-технічних конференціях «Енергоощадні машини і технології» (Київ, 2013, 2015); Першій науково-практичній конференції біомедичних інженерів і технологів України «Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії і медичної промисловості України» (Київ, 2015); XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Одеса, 2016); Міжнародних науково-технічних конференціях «Вібрації в техніці та технологіях» (Вінниця, 2017; Львів, 2018; Київ, 2019); IX International Conference «Heavy Machinery-НМ 2017» (Zlatibor, 2017); XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Промислова гідравліка і пневматика» (Вінниця, 2017); Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України» (Вінниця, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційний розвиток харчової індустрії» (Київ, 2017); I Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (Вінниця, 2019).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 58 наукових праць, у тому числі 1 монографія, 36 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях іноземних держав та 2 статті у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science), 3 патенти на корисну модель, 18 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел (364 найменування) та 4 додатків (на 39 сторінках). Загальний обсяг роботи становить 433 сторінки, у тому числі 330 сторінок основного тексту, 121 рисунок та 25 таблиць.

РОЗДІЛ I

СТАН ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Область застосування та фізичні аспекти кавітаційної технології обробки рідинних середовищ

Кавітаційна технологія займає чільне місце в ряду передових і ефективних методів обробки рідинних середовищ та створення нових матеріалів. Реалізується така технологія для низки різних технологічних процесів, зокрема диспергування, емульгування, гомогенізація, дегазація, екстрагування, кристалізація, стерилізація та інших в хімічній галузі та переробних виробництвах [1–62, 65, 68–91, 93–112, 114–122, 124–127]. Загальноприйнятим визначенням кавітації, як фізичного явища, вважається процес утворення порожнин (певного розміру бульбашок) в потоці рідини під дією зовнішнього тиску. В залежності від методу формування тиску в середовищі, кавітація може бути гідродинамічною або акустичною.

За гідродинамічної кавітації зниження тиску відбувається за рахунок збільшення локальних швидкостей рідинного потоку [62, 65]. Якщо зниження тиску обумовлене проходженням акустичних хвиль звукового або надзвукового спектру частот коливань – кавітація вважається акустичною [59–61]. Використання ультразвукової енергії для реалізації технологічних процесів набуло застосування з середини 20 ст.

Кавітація широко застосовується в хімічній, машинобудуванні, харчовій, будівельній та інших галузях промисловості, а також в медицині та агропромисловому виробництві [137, 153, 154, 162–169, 172–174, 207–211, 214–216, 227–231, 239–241, 250, 258]. Ультразвукова кавітаційна обробка в'язких технологічних середовищ (масла, нафти, полімерів та ін.) має важливе значення для хімічної промисловості. Так, застосування ультразвуку з інтенсивністю, що перевищує поріг виникнення кавітації в хімічній промисловості дозволить значно поліпшити якість продуктів, знизити

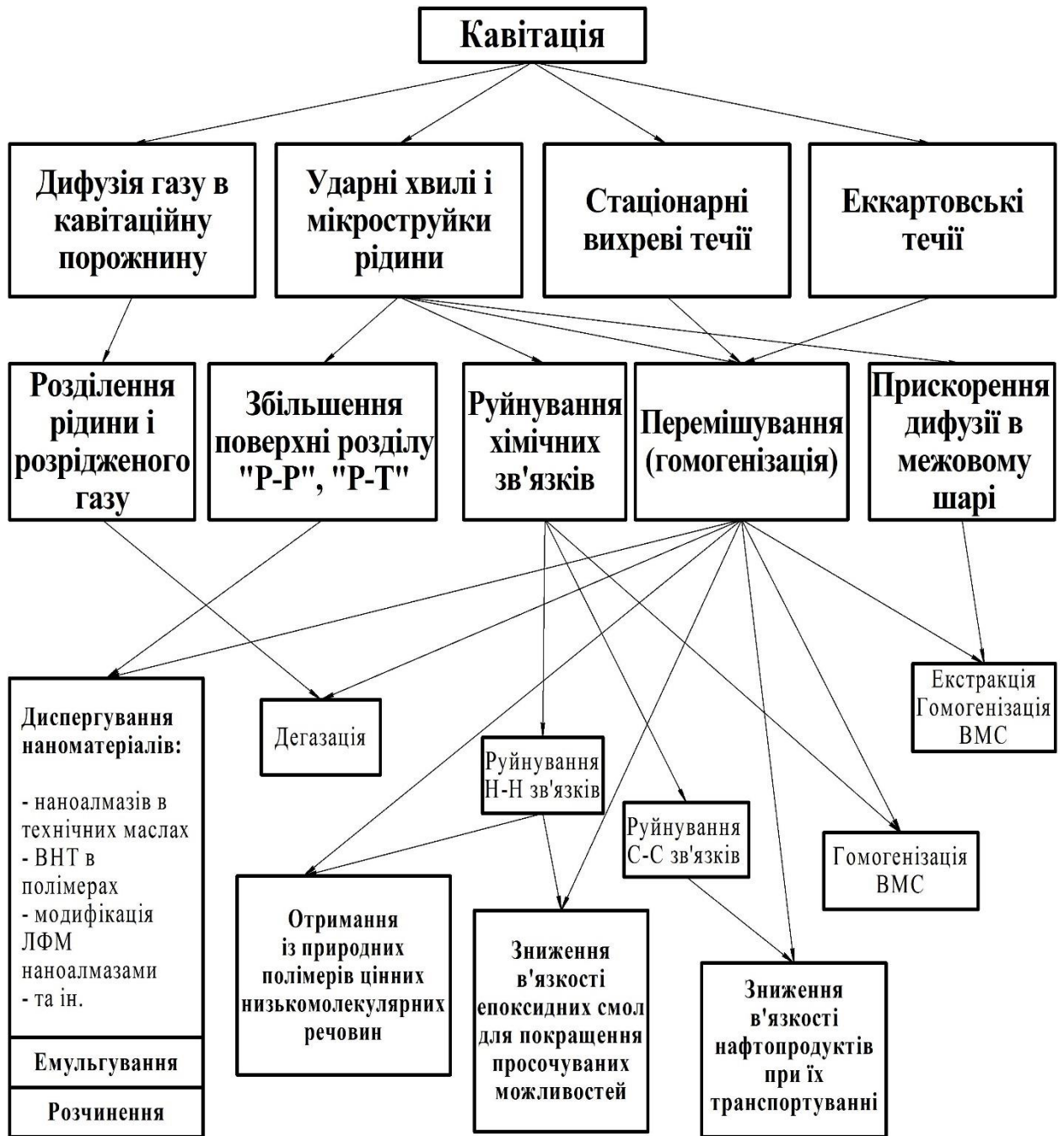
кількість розчинників і добавок. Застосування акустичної кавітаційної набуло використання також і в інших виробництвах [68–71, 119, 125] для обробки різних рідинних середовищ.

Ультразвук використовують для очищення металевих, скляних, керамічних та інших матеріалів від забруднень. Основними перевагами ультразвукового очищення є висока якість і бактерицидна дія. А також можливість очищення деталей складної форми, з наявним забрудненням у важкодоступних місцях, вузьких щілинах, маленьких отворах і порожнинах. У деяких технологіях необхідна дегазація рідини. Під дією ультразвуку спостерігається очищення рідин від газів безпосередньо в трубопроводах. Засмічення фільтрів, сіток, мембран можна вирішити накладенням потужного ультразвукового поля або в зону фільтрування, або на сам фільтрувальний елемент. Завдяки потужному кавітаційному полю і звукокапілярному ефекту можна не тільки прискорити процес фільтрації, але і очистити фільтруючий елемент від забруднень. Цей метод можна застосовувати як для металевих і полімерних сіток, так і для керамічних фільтрів і мембран ультрафільтрації. Обумовлене це високою ефективністю та можливістю впливу на оброблювальне середовище широким амплітудно-частотним спектром ультразвукових коливань. Фізичні явища, що виникають в процесі реалізації кавітації, характеризуються широкою гамою різних ефектів (рис. 1.1).

Приведена низка фізичних ефектів обумовлена швидкодією протікання кавітаційних процесів, високою якістю і іншими перевагами.

Фізика процесу кавітаційної технології обробки середовищ для приведених способів використання полягає в наступному. Під дією зовнішніх сил в оброблювальному середовищі виникають хвилі стиснення та розтягування, що і реалізують той чи інший технологічний процес обробки технологічного середовища. В напівперіод розтягнення в хвилі деформації утворюються парогазові бульбашки, які в напівперіод стиснення в хвилі деформації захоплюються [112–114]. На стадії сплескування бульбашки виділяється імпульс високого тиску в формі ударної хвилі або, якщо поблизу

знаходиться жорстка або еластична поверхня, утворюється потужний кумулятивний мікрострумінь в напрямку цієї поверхні.



«Р-Р» - «рідина-рідина», «Р-Т» - «Рідина-тверде тіло», ВМ - високомолекулярні сполуки, ВНТ - вуглецеві нанотрубки, ЛФМ - лакофарбові матеріали

Рисунок 1.1 – Класифікація фізичних ефектів при кавітаційній обробці середовищ

В процесі сплескування бульбашки можлива її високочастотна осциляція з випромінюванням в навколишню рідину енергії в ультразвуковому діапазоні. Значну кількість динамічно зростаючих бульбашок можна розглядати як, свого роду, мікротрансформатори, що перетворюють акумульовану в системі потенційну енергію в кінетичну енергію рідини, розподілену дискретно в просторі і в часі [102, 113]. За швидкого зниження зовнішнього тиску виникають ефекти вибухового скипання, які супроводжуються випромінюванням імпульсу тиску великої амплітуди і турбулізацією прилеглих шарів рідини. Як наслідок, в просторі між бульбашками можливі інтенсивні мікротечії з високими миттєвими значеннями локальної швидкості, прискорення і тиску.

Виходячи із наведеної вище інформації, стає очевидним значний інтерес до застосування акустичної кавітації для реалізації технологічних процесів.

Існує кілька гіпотез, що пояснюють механізм кавітаційного руйнування, але жодна з них не підтверджена експериментально. Пояснюється це тим, що кінцева стадія закривання протікає за надзвичайно короткий термін, який обчислюється величинами порядку $10^{-8} \dots 10^{-9}$ с [99]. В цілому вважається, що весь процес кавітації складається із наступних основних стадій пульсуючого руху парогазових бульбашок: утворення, розширення, стиснення і сплескування [99–108]. Варто додати ще і стадію осциляції (коливань) бульбашок, які не встигають захлопнутися. Здійснюючи пульсуючий рух, бульбашка може пропустити один або декілька періодів стиснення. Бульбашки протягом великого числа періодів здійснюють коливання біля своїх максимальних розмірів (більш 100 – 1000 мкм) [99]. За підвищення амплітуди звукового тиску вище деякого критичного значення кавітаційні бульбашки досягають критичних розмірів, при яких відбувається їх виродження в довгоживучі. Цілком очевидно, що наявність таких бульбашок певною мірою знижує ефективність процесу кавітації. Причин такої поведінки бульбашки є декілька, в тому числі і інерційність рідини. Більше того, визначення достовірного значення, так званого, коефіцієнта кавітації [84–86], що являє

собою відношення об'єму кавітаційних бульбашок до повного об'єму є умовним. Отже, виникає проблема встановлення області, або точніше, того об'єму, що реально відображає процес сплескування бульбашок. Очевидно (рис. 1.2), що дослідження процесу утворення та розвитку кавітаційної області представляє собою незрівнянно більш складну задачу у порівнянні з дослідженнями динаміки однієї кавітаційної бульбашки [96].

І саме тому до цього часу відсутня загальноприйнята модель процесу утворення та розвитку кавітаційної області і така задача іще не вирішена до цього часу.

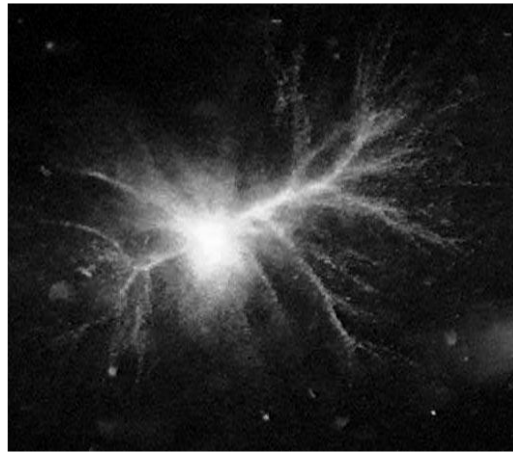
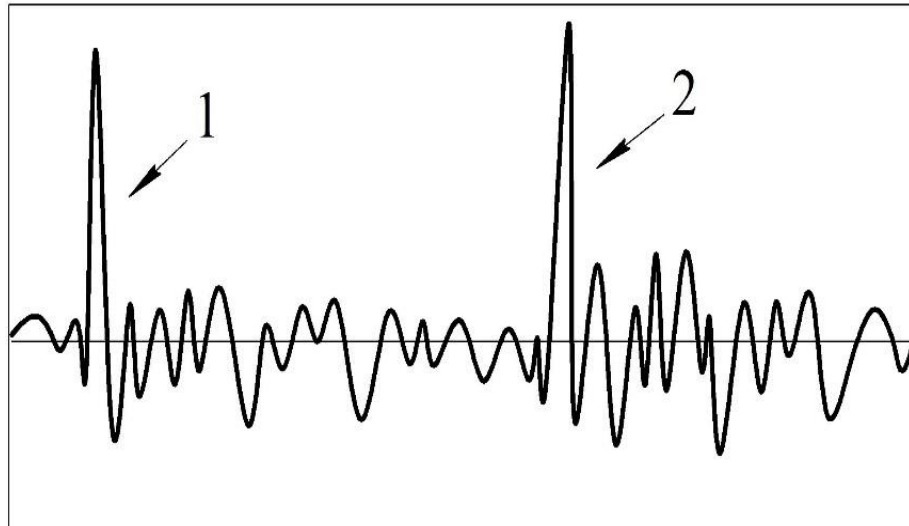


Рисунок 1.2 – Структура поточкових бульбашок, що виникає в стоячій акустичній хвилі (яскраві області відповідають світлу, розсіяному бульбашками, час впливу 2 мс)

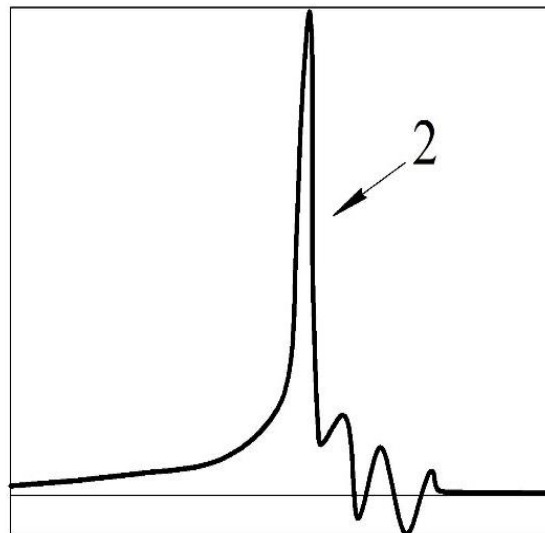
Навіть дослідження динаміки однієї кавітаційної бульбашки по різному здійснюється та трактується в цитованих вище роботах. Разом з тим, отримані результати вивчення динаміки однієї кавітаційної бульбашки, особливо для аналізу якісної картини процесу, можуть бути використані для подальшого розвитку теорії робочого процесу ультразвукової обробки технологічних середовищ.

Звичайно, треба враховувати при цьому можливу взаємодію між бульбашками, що важливо при визначенні параметрів, особливо для реалізації

резонансних режимів. Дійсно, свідченням складного руху навіть однієї кавітаційної бульбашки є зміна її руху у часі між етапами росту та сплескування, що зазначається в [60], (рис. 1.3), приведений за результатами роботи [171].



а



б

а – у часі росту бульбашки (1) та в момент його сплескування і руйнування (2); б – момент завершення сплескування бульбашки та її руйнування

Рисунок 1.3 – Імпульси тиску на екрані осцилографа

Дослід проводився в холодній воді, а бульбашка утворилася в результаті електричного розряду. Як слідує із приведеного рисунка, після руйнування бульбашки проявляються високочастотні імпульси тиску (від 25 до 100 кГц).

Цей факт свідчить не тільки про складність протікання технологічного процесу, а і про наявність високочастотних складових, що було відмічено також і в роботі [59].

Разом з тим, при детальному розгляді руху бульбашки до моменту її колапсу, можна побачити наявність високочастотних складових і на цьому етапі її руху. Варто пригадати, що довгий час вважалася лінійною зміна тиску аж до висловленого прогнозу відхилення лінійної залежності Пуассоном (див. аналіз фізичних моделей п.1.3). Важливо усвідомлено враховувати подібні ефекти для конкретних технологічних середовищ, в яких суттєво проявляються нелінійні ефекти при визначенні параметрів та їхній вплив на розвиток кавітаційної області.

Таким чином, можна зазначити наступне. Здійснений огляд літературних джерел [59 – 62, 72– 91, 94 – 108, 112 – 114, 120 – 122, 127,131, 142,159-161, 176, 286, 289, 338] засвідчує неоднозначність тлумачень та визнання різних стадій акустичної кавітаційної обробки. Напрацювання про дослідження руху окремо взятої бульбашки мають місце в роботах [96, 97, 178]. Основними результатами, отриманими в цитованих вище роботах є те, що процес акустичної кавітаційної обробки технологічних середовищ представляється надто складним. Він супроводжується зміною акустичних параметрів та масо- і теплопереносом [60, 116, 118, 123].

Певна відмінність в роботах полягає у поглядах та степені врахування в розрахунках видів трансформованої в середовище енергії: на утворення ударних хвиль, теплову енергію, локальну електризацію бульбашок, збудження сонолюмінесценції, утворення вільних радикалів та інші енергетичні витрати. Мало уваги приділено законам зміни реологічних властивостей технологічних середовищ в процесі їхньої обробки та необхідності оцінки і врахування цих змін в практичних розрахунках.

В повному об'ємі не розглядався взаємовплив кавітаційного апарату і технологічного середовища, яке кавітаційній обробці. Відсутні фундаментальні дослідження щодо пошуку умов перетворення електричної енергії в енергію акустичних коливань в частині оптимізації випромінюваної енергії в робоче середовище на основі ефектів можливого суттєвого взаємовпливу кавітаційного апарату і технологічного середовища. Такі дослідження потребують узгодження сил акустичного апарату з опором середовища, як реакцію на силову дію апарату. Визначення опору середовища на дії кавітаційного апарату має ґрунтуватися на врахуванні його масових характеристик та реологічних властивостей: пружність, в'язкість, пластичність на основі континуальних моделей. Безумовно, що для здійснення таких досліджень необхідним є розгляд класифікаційних ознак оброблювальних середовищ, а також оцінка існуючих фізичних та математичних моделей досліджуваного класу технологічних середовищ та оброблювальних матеріалів.

1.2 Класифікаційні ознаки оброблювальних середовищ

Важливим аспектом дослідження процесу ультразвукової обробки технологічних середовищ є встановлення їх класифікаційних ознак. В такому разі відкриваються реальні можливості для обґрунтування та вибору ключових параметрів, які увійдуть в розрахункові моделі. Необхідність наявності такої класифікації обумовлена визначеннями і встановленням числових параметрів реологічних властивостей технологічних середовищ, що надасть можливість їхньої структуризації. Така інформація конче потрібна для обґрунтованого напрямку формування алгоритму та методик підбору кавітаційного апарату. За таких умов ключовими ознаками класифікації являються: стан середовища, характер якісної поведінки середовища, наявність дисперсності середовища, реологічні властивості та акустичні параметри. В залежності від співвідношення межі текучості τ при чистому зсуві до атмосферного тиску

P_a технологічне середовище за своїм станом може бути [119]:

$$\begin{aligned} &\text{твердопластичним за умови: } \frac{\tau}{P_a} \geq 1; \\ &\text{рідінопластичним за умови: } \frac{\tau}{P_a} = 1; \\ &\text{рідинним за умови: } \frac{\tau}{P_a} \leq 1. \end{aligned} \quad (1.1)$$

За характером якісної поведінки при акустичному навантаженні в середовищі (1.1) можуть виникати хвильові явища, або ці явища відсутні. Врахування хвильових явищ в кавітуючому середовищі можна оцінити за співвідношенням часу розповсюдження хвиль $t_{\text{хв}}$ і періоду коливань T [115] за таких умов:

$$\left. \begin{aligned} \tau &< T; \\ \tau &> T; \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

За першої умови (1.2) процес коливання середовища можна вважати повільним і знехтувати пружною хвилею. В такому випадку прискорення і деформації визначаються виключно силами, є постійними та незмінними у напрямку дії зовнішніх сил на таке середовище.

При виконанні другої умови (1.2) рух середовища визначається не тільки силами, а і пружними хвилями. Переміщення, швидкість і прискорення за величиною змінюються і залежать не тільки від часу, а і від координати за напрямком якої діють зовнішні сили на таке середовище. Отже, в першому випадку домінують інерційні сили, а в другому – пружні. В більшості реальні середовища, що підлягають дослідженню, знаходяться між цими критеріями залежності (1.2). Тобто, як правило, необхідно враховувати і пружні, інерційні та дисипативні властивості (табл. 1.1).

Із наведеної таблиці слідує, що вид структури середовища обумовлює його якісні характеристики. Дисперсні середовища, як системи за кінетичними властивостями дисперсної фази можна розділити на два класи: вільні дисперсні системи, в яких дисперсна фаза рухома і зв'язані дисперсні системи. Це системи з твердим дисперсним середовищем, в якому частинки дисперсної фази зв'язані між собою і не можуть вільно переміщуватися.

Таблиця 1.1 – Класифікаційні ознаки технологічних середовищ за реологічними властивостями

Ідеально тверде тіло	Пружне тіло	Пластичне тіло	Реологічне тіло	Істинно в'язка рідина	Ідеальна рідина
При будь- яких нормальних і дотичних напруженнях деформація дорівнює нулю	Напруження пропорційне деформації	При досягненні граничного напруження зсуву починаються пластичні деформації	Лінійні - складові з тіл по графам 2, 3, 5, нелінійні – емпіричні	Напруження пропорційне градієнту швидкості в першій ступені	В'язкість і стисненість дорівнює нулю

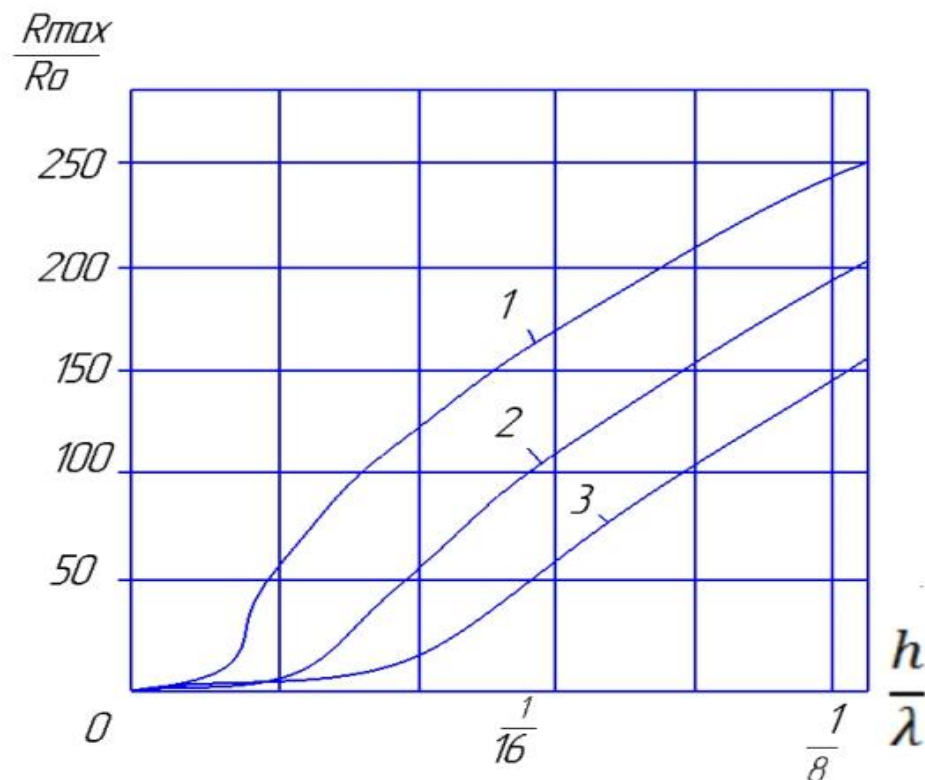
Вільні дисперсні системи в свою чергу можуть бути ультрамікрогенні, мікрогетерогенні та грубодисперсні. Відрізняються вони між собою розмірами частинок. Так, розміри ультрамікрогенних частинок знаходяться в межах від 1 до 100 нм, а мікрогетерогенні – в межах 0,1...10 мкм, а грубодисперсні мають розміри, що перевищують 1 см [119].

Важливим параметром, що може слугувати класифікаційною ознакою, являється в'язкість технологічного середовища. Необхідність розробки класифікації технологічного середовища за в'язкістю обумовлена запропонованою науковою ідеєю дисертаційного дослідження [55]: «вдосконалення технологій та обладнання ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ забезпечується шляхом визначення і спільним використанням внутрішніх властивостей оброблювальних середовищ і робочого обладнання, як єдиної акустичної системи».

Для реалізації наукової ідеї першою умовою є аналітичне визначення контактного тиску, який представляє собою сукупність активних і реактивних

сил середовища, де обов'язковою процедурою є врахування в'язких властивостей. Раніше така класифікація ніким не приводилася, хоча вплив в'язких властивостей технологічних середовищ на форму бульбашки та на визначення параметрів звертається увага в роботах [60, 86, 95–97, 102–107, 112, 113, 135, 141]. В роботі [131] відмічається, що за поширення звуку в рідині, бульбашки, які коливаються на частоті, близької до резонансної, викликають значне загасання звукової енергії.

Ступінь впливу в'язкості в залежності радіусу кавітаційної бульбашки від товщини шару рідини при реалізації кавітаційного процесу (рис. 1.4, 1.5) приведено в роботі [101].

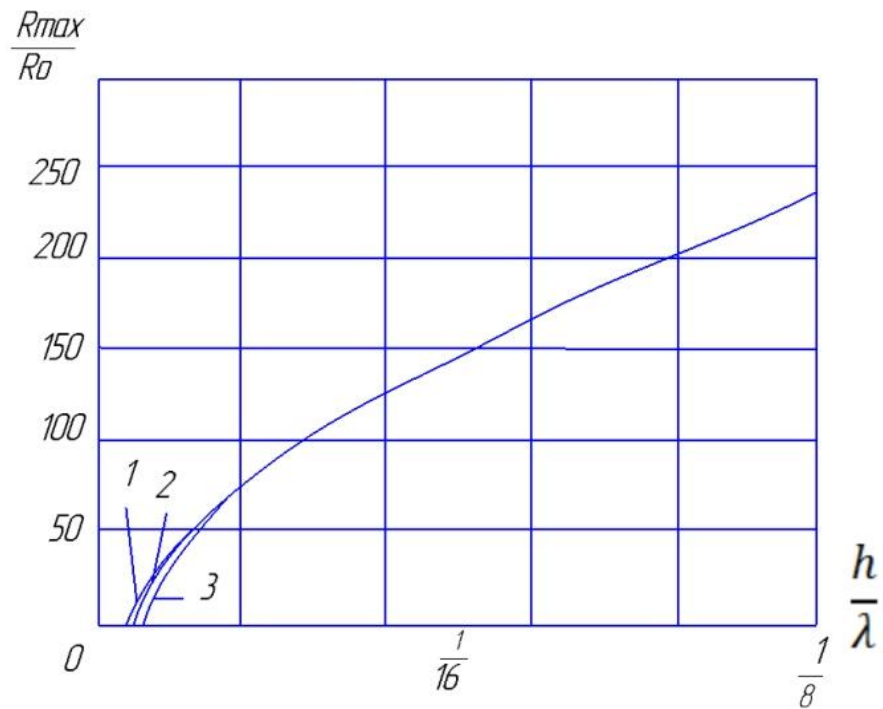


$$1 - 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}, 2 - 30 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}, 3 - 100^{-3} \text{ Па}$$

Рисунок 1.4 – Вплив в'язкості в залежності радіусу кавітаційної бульбашки від товщини шару рідини

Як слідує із графіків, в'язкість значно перевищує поверхневий натяг

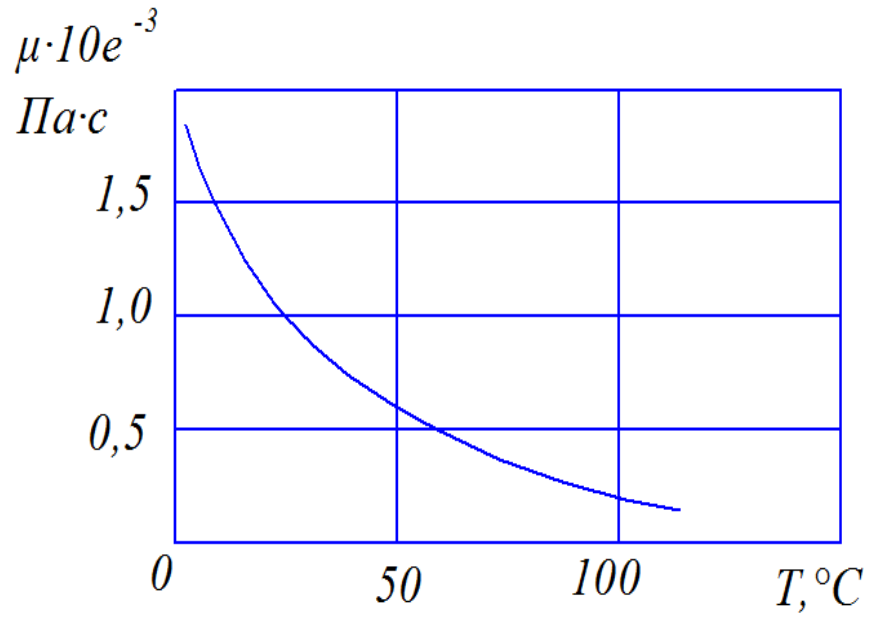
рідини за ступенем впливу на величину порогової товщини шару. Із збільшенням в'язкості зменшується максимальний радіус кавітаційної бульбашки. Це важливий результат. Він засвідчує необхідність врахування в'язкості, як ключового параметру, що суттєво впливає на енергетику кавітаційного процесу.



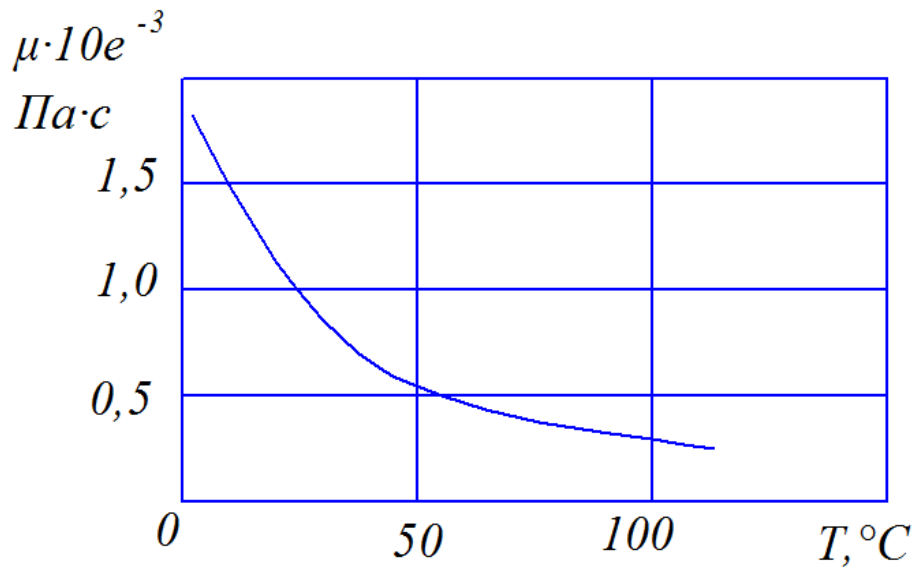
1 – поверхневий натяг 150^{-3} H / м ; 2 – поверхневий натяг 72^{-3} H / м ; 3 –
поверхневий натяг 1^{-3} H / м

Рисунок 1.5 – Вплив поверхневого натягу на залежність радіусу кавітаційної бульбашки від товщини шару рідини

Отже, розсіяння енергії в кавітаційній області, певним чином впливає на формування бульбашок кавітаційної області, етапи їх розвитку, сплескування, спонукає до збільшення температури середовища. На цей факт звернуто увагу і в роботі [122] (рис. 1.6).



а



б

а – вода; б – спирт етиловий (96%)

Рисунок 1.6 – Залежність в'язкості середовища від температури

Теорія поведінки середовищ, що розглядаються як в'язкі рідини, заснована на моделі Ньютона [86, 101], що встановлює лінійний зв'язок між дотичними напруженнями та відповідними швидкостями незворотної деформації зсуву, описує модель середовища, як лінійно-в'язку рідину за

відсутністю процесу її стискування.

Лінійній моделі відповідають лише прості рідини. Більш складні за структурою рідини, наприклад, розчини, дисперсні текучі системи в більшості випадків мають криву течії, не співпадаючу з ньютонівською. В даний час існує велика кількість напівемпіричних і емпіричних реологічних моделей, серед яких можна відзначити, відповідно до [101], найбільш часто вживані в наукових дослідженнях моделі – псевдо-пластичні («чисто в'язкі») середовища, а також в'язко-пластичні середовища, що описуються різними законами течії (табл. 1.2).

Параметри $k, n, t, \alpha, \mu_0, \mu_\infty, \mu_p, \theta_0$ – постійні параметри; а $A, B, C, \varphi_0, \tau_1, \varphi_\infty$ – реологічні параметри і коефіцієнти, які визначаються для конкретних рідин; $\varphi = 1/\mu$ – плинність середовища.

Відомо, що будь-яка неньютонівська рідина має лінійні ділянки кривої течії при малих і великих (вельми великих) швидкостях зсуву $\dot{\gamma}$ [117]. У першій області реалізується так звана «найбільша» ньютонівська в'язкість μ_0 або «в'язкість при нульовій швидкості зсуву»

. У другій області – «найменша» ньютонівська в'язкість μ_∞ або «в'язкість при нескінченно великому зсуві». Удавана в'язкість для ступеневих моделей передає реальну поведінку непластичних чисто в'язких середовищ і в проміжній області μ_0 і μ_∞ .

Однак, при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ або $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ такі закони далекі від реальних, що власне і обумовлено прийнятими умовами зміни швидкості. В роботі [141] зазначається, що закони *Елліса, де Хавена* при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ (і малих напруженнях зсуву), а також при τ помірних значень відображають реальність течії, але при $\tau \rightarrow \infty$ мають нульову в'язкість, а в моделі *Сіско* при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ в'язкість наближається до нескінченно великих величин. Тобто, застосування того чи іншого закону для визначення τ визначаються ступенем впливу в'язкості.

Таблиця 1.2 – Основні закони та аналітичні залежності, що враховують в'язкі і в'язко-пластичні властивості дисперсних середовищ

Модель середовища	№ п/п	Назва закону	Аналітична залежність
В'язка	1	<i>Оствальда-де Віля</i>	$\tau = k \cdot \dot{\gamma} ^{n-1} \cdot \dot{\gamma}, n > 1$
	2	<i>Елліса</i>	$\tau = (A + B \cdot \tau ^{\alpha-1})^{-1} \cdot \dot{\gamma}, \alpha > 1 \text{ або } \alpha < 1$
	3	<i>Сіско</i>	$\tau = (A + B \cdot \tau ^{n-1}) \cdot \dot{\gamma}, n > 0$
	4	<i>де Хавена</i>	$\tau = \frac{\mu_0}{1 + C \cdot \tau ^n} \cdot \dot{\gamma}, n > 0$
	5	<i>Прандтля</i>	$\tau = A \cdot \dot{\gamma} \cdot \arcsin(\dot{\gamma} / c)$
	6	<i>Прандтля-Ейрінга</i>	$\tau = \operatorname{arsh}(\dot{\gamma} / B)$
	7	<i>Ейрінга</i>	$\tau = \dot{\gamma} / B + C \cdot \sin \frac{ \tau }{A}$
	8	<i>Пауля-Ейрінга</i>	$\tau = \left[C + \frac{1}{B \cdot \dot{\gamma} } \cdot \operatorname{arsh} \left(\frac{\dot{\gamma}}{A} \right) \right] \cdot \dot{\gamma}$
	9	<i>Уільямсона</i>	$\tau = [A / (B + \dot{\gamma}) + \mu_\infty] \cdot \dot{\gamma}$
	10	<i>Рейнера-Філіппова</i>	$\tau = \left[\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\tau / A)^2} \right] \cdot \dot{\gamma}$
В'язко-пластична	11	<i>Шведова-Бінгама</i>	$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$
	12	<i>Гершеля-Балклі</i>	$\tau = \tau_0 + A(\dot{\gamma})^n$
	13	<i>Бріана</i>	$\tau = \mu_\infty \cdot \dot{\gamma} \cdot \left(1 + \frac{\tau_\infty}{\mu_\infty \cdot m \cdot \dot{\gamma}} \right)^m$
	14	<i>Кроулі-Кітца</i>	$\tau = \mu_\infty \cdot \left[\frac{1,2 + V(\theta_0 \cdot \tau^{-0,2} + 1)^3}{1,2 - 2V(\theta_0 \cdot \tau^{-0,2} + 1)^3} \right] \dot{\gamma}$
	15	<i>Кессона</i>	$\tau = (k_0 + k_2 \cdot \dot{\gamma}^{1/2})^2$
	16	<i>Шульмана</i>	$\tau = \left[\tau_0^{1/n} + (\mu_p \cdot \dot{\gamma})^{1/m} \right]^n$

Неньютонівські рідини можуть бути описані статичними моделями виду (одновимірне зрушення, $\dot{\gamma} > 0$):

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1.3)$$

де $k, \dot{\gamma}^n$ – реологічні параметри, які є постійними для даної рідини в деякому обмеженому діапазоні зміни швидкостей зрушення. Параметр k – міра консистенції рідини: чим менш рухливе середовище, тим k вище. Параметр n характеризує ступінь неньютонівської поведінки середовища. Чим сильніше n відрізняється від 1 (у більшу або меншу сторону), тим чіткіше проявляється аномалія в'язкості і нелінійність кривої течії.

В роботі [141] зазначається, що в наведеному реологічному рівнянні розмірності змінних $\dot{\gamma}$ і τ фіксовані, а це означає, що для середовища із різним значенням параметра n параметр k змінюється не тільки кількісно, а й якісно. Такий висновок засвідчує, що достовірність рівняння справедлива лише в рамках конкретного середовища, а параметри n і k отримані і справедливі виключно в рамках виконаних експериментів.

Отже, загальноприйнятого закону до врахування в'язких властивостей, незважаючи на низку пропозицій, не має. Очевидно, необхідно в кожному конкретному випадку для умов обробки технологічних середовищ коректно враховувати в'язкість як при малих, так і при помірних швидкостях дії на досліджуване середовище.

В роботі [100] пропонується універсальна реологічна модель, загальна для всіх рідин широкого класу (наприклад, неньютонівських, чисто в'язких), яка в принципі не є модифікацією ступеневого реологічного рівняння. При цьому неньютонівська в'язкість будь-яких текучих речовин у всьому можливому діапазоні зміни швидкостей зрушення змінюється від одного постійного значення μ_0 до іншого μ_∞ причому $\mu_0 > \mu_\infty$.

Проведений аналіз засвідчує наявність різних підходів до врахування в'язких властивостей середовищ, що знаходяться в умовах дії на них певних величин тисків та швидкостей. Варто зауважити, що основу розглянутих залежностей в тій чи іншій мірі визначають прийнятою методикою вимірювання в'язкості, як відношення напруження до градієнту швидкості

зрушення. У випадку обробки дисперсних середовищ в'язкість суттєво впливає на енергетику технологічного середовища та має бути прямо або опосередковано визначеною. Тому важливим аспектом досліджень являється не тільки обґрунтування та вибір аналітичної залежності, а і оцінка існуючих методів визначення в'язкості в конкретних технологічних операціях обробки дисперсного середовища та адаптації того чи іншого в'язкого чи в'язко-пластичного закону зміни реологічних властивостей.

Розглядаючи методи визначення в'язкості, варто зазначити, відповідно до процесів ультразвукових кавітаційних методів обробки найближчим є застосування одного із розділів феноменологічної реології, в якій на відміну від мікрореології і макрореології, реологічні дослідження межують з фізикою і хімією, оскільки стан кавітуючого середовища нерозривно пов'язаний з параметрами цього процесу. Основна складність процесу точного визначення в'язкості полягає в тому, що класичний спосіб застосування віскозиметрів або пластометрів [117], передбачає можливості розділити властивості, що належать прибору і технологічному середовищу, а в умовах реальної зміни реологічних властивостей під дією ультразвуку, відобразити в експериментальному визначенні системою «прибор – середовище» практично не можливо. Для рішення такої проблеми корисними є застосування теорії розпізнавання образів, статичної перевірки гіпотез та використання розрахункових формул і даних експерименту реального кавітаційного процесу.

За енергетичним підходом коефіцієнт в'язкості технологічного дисперсного середовища можна представити комплексною мірою дисипації механічної енергії або ступенем розсіювання тепломеханічної енергії кавітаційного середовища. Виконаний аналіз [56] засвідчив, що коефіцієнт згасання акустичних хвиль враховує:

- силу в'язкого опору між сусідніми частинками середовища, які володіють різними швидкостями;
- втрати, що виникають при всебічному стискуванні середовища;

– втрати, що обумовлюють вплив теплопровідності.

Перша складова розсіювання енергії виникає із впливу внутрішнього тертя, що діє на частинки середовища, в якій розповсюджується акустична хвиля. В основі другої складової розсіювання енергії є релаксаційний процес, який впливає на поглинання хвиль в обмеженій полосі частот. Третя складова розсіювання енергії представляє собою перенесення тепла із області стискування в область розрідження акустичної хвилі.

Разом з тим, приведена залежність в цілому відображає можливі втрати. Аналітичний вираз для визначення коефіцієнта згасання отримують шляхом рішення хвильового рівняння середовища з врахуванням розсіювання енергії, в якому комплексне хвильове число складається із дійсної і мнимой частин, яка і дає можливість отримати коефіцієнт згасання:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c_{x\phi}^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \eta' + \chi \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (1.4)$$

де ω – частота, $c_{x\phi}$ – швидкість розповсюдження хвилі; ρ_0 – щільність; η, η' – коефіцієнти в'язкості зсуву та об'ємної в'язкості; χ – коефіцієнт теплопровідності; c_v, c_p – питома теплоємність газу при постійному об'єму та постійному тиску відповідно.

Ступінь впливу приведених складових визначається конкретними процесами обробки технологічного середовища. Однак, реальне застосування залежності (1.4) є надто складним процесом і в розрахунках (внаслідок малого значення коефіцієнта χ у порівнянні з іншими) формула спрощується і, як правило, враховується тільки перша складова розсіювання енергії. В цілому варто відмітити загальну залежність коефіцієнта згасання хвиль, за яким поглинання акустичної хвилі змінюється пропорційно квадрату частоти і зворотно пропорційно швидкості її розповсюдження. Левова частка розсіювання енергії залежить від коефіцієнта зсувної в'язкості.

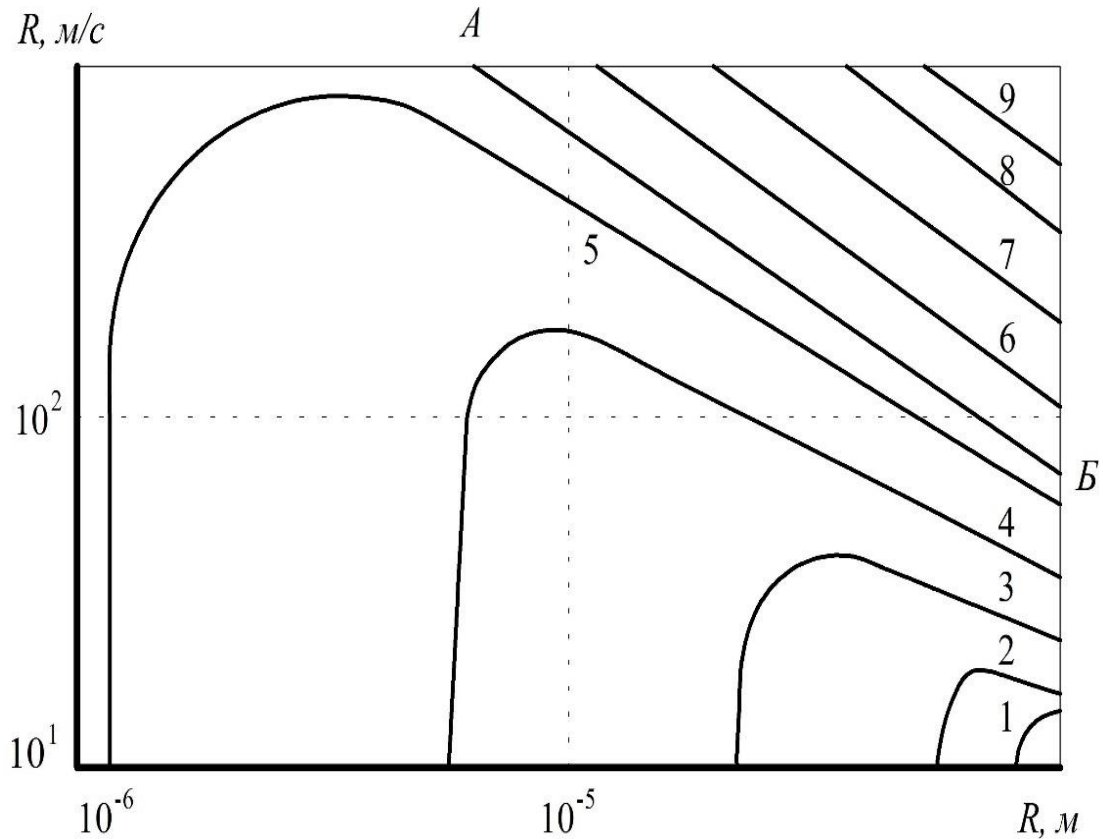
Ряд робіт [95, 97, 102, 104, 112] в дослідженнях процесів утворення і сплескування кавітаційної бульбашки в рівняннях в'язкий член враховують у

відповідності до тої чи іншої гіпотези тертя. Для середовищ, що підкоряються лінійній зміні напруження зсуву від градієнта швидкості, середовища розглядають, як ньютонівську рідину [117] та пульсуючими [60]. Іншою особливістю в'язкої рідини є її високий газовміст ($\delta = 0,005$), який пояснюється малою швидкістю спливання і видалення бульбашок газу з рідини. Постійна присутність відносно великих бульбашок газу в в'язких рідинах (типу гліцерину) сильно знижує їх кавітаційну міцність.

Вплив в'язкості і стисливості рідини на ріст і сплескування кавітаційної бульбашки теоретично досліджувався в багатьох роботах [73-77, 102, 104, 112]. У цих роботах в'язкий член у рівнянні, що описує радіальний рух бульбашки, враховується тільки через граничні умови, тому співвідношення між в'язкими членами в рівнянні руху і членами, що враховують стисливість, не зовсім ясна, оскільки за умови суворої постановки задачі дослідження необхідно враховувати не лише зсувну, а й звичайну в'язкість. В роботі [60] було оцінено вплив в'язкості та стисливості середовища на динаміку кавітаційної бульбашки із застосуванням диференціального нелінійного рівняння Нав'є-Стокса, що враховує зсувну та об'ємну в'язкість. Приймаючи наступні числові значення величин: $P_{\infty} \approx 10^5 \text{ Н/м}^2$, $P_m \approx 10^5 \text{ Н/м}^2$, $R_0 = 10^{-5} \text{ м}$, $2\sigma/R_0 = 10^4 \text{ Н/м}^2$, $4\mu\dot{R}/R \approx 4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$, було виявлено, що при $R \leq 10^{-5} \text{ м}$, $\mu \geq 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $R \geq 100 \text{ м/с}$ в'язкий член на два порядки більше всіх інших. Результатом рішення являється графік зміни швидкості стиснення вакуумної бульбашки у в'язкій рідині (рис. 1.7).

Із графіків (див. рис.1.7) слідує, що за певного значення коефіцієнта в'язкості, коли залежність $R = \varphi(R)$ виражається прямою лінією (лінія АБ), нижче якої розташована область значень R, \dot{R} , при яких сплескування бульбашки не відбувається. Другим висновком є те, що швидкість змикання бульбашок, параметри яких відповідають значенням, лежачим нижче прямої АБ, спочатку має значення, що мало відрізняються від звичайних, а потім майже стрибкоподібно швидкості їх змикання падають. Це відбувається тому,

що якщо в якийсь момент дія в'язких сил дорівнює інерційним, відбувається гальмування процесу кавітації.



крива 1 – швидкість – 12 м/с; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 50; 5 – 80; 6 – 110; 7 – 200;
8 – 500; 9 – 800 м/с

Рисунок 1.7 – Швидкість стиснення вакуумної бульбашки у в'язкій рідині ($\mu = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$) під дією інерційних сил [84]

Ультразвукова кавітаційна обробка технологічних середовищ хімічної промисловості (масла, нафти, полімерів та ін.) має важливе значення. Проте широке застосування ультразвукової кавітаційної обробки таких технологічних середовищ стримується із за відсутності оптимізації параметрів із урахуванням в'язкості та визначення ефективних режимів обробки. Як і було показано вище, сили в'язких напружень значно перевищують сили поверхневого натягу, особливо в стадії розширення бульбашки. Це підтверджує числовий приклад, наведений в роботі [101]:

$$\frac{4\eta \frac{\partial R}{\partial t}}{\frac{2\sigma}{R}} \sim \frac{4\eta R_{max}}{\sigma T} = \frac{4f\eta R_{max}}{\sigma} > 20,$$

де R – миттєвий радіус кавітаційної бульбашки, м; η – в'язкість несучої рідкої фази, Па·с; σ – поверхневий натяг несучої рідкої фази, Н/м; T – період акустичних коливань, с; f – частота акустичних коливань, Гц; R_{max} – максимальний радіус бульбашки, що досягається в стадії її розширення, м.

У цьому рівнянні прийнято числове значення в'язкості 100 мПа·с, а поверхневий натяг 0,032 мН/м, що є типовим для більшості рідин [99].

Важливим параметром, який входить в ці залежності, а отже здійснює суттєвий вплив на процес кавітації, є швидкість звуку c_k . Його визначенню присвячена низка робіт [78, 84–87, 89, 90, 143–145]. Так, в роботах [144, 145] відмічається, що швидкість звуку в технологічних газорідинних середовищах залежить від співвідношення газової і рідинної компонент і, наприклад, для води, яка має газові бульбашки, діапазон зміни c_k коливається в доволі широких межах значень: 20...100 м/с. За даними роботи [90] числові значення c_k в кавітуючій рідині змінюються в більш вузьких межах $c_k=25...30$ м/с, а в роботі [144] наводяться числові значення і ще в менших межах $c_k=10...12$ м/с.

В роботі [145] шляхом розгляду стаціонарного кавітаційного процесу під каналом капілятора, отримані значення для швидкості $c_k = 2.0 \pm 0.5$ м/с, що перевищує попереднє значення в 2,66 рази. Така суттєва відмінність між значеннями швидкості розповсюдження звуку, що наведені в зазначених роботах, можливо пояснити різними методиками їх визначення. Другою причиною такої суттєвої відмінності в числових значеннях швидкостей може бути відсутність фіксації тої частини протікання кавітаційного процесу, в якому визначалася ця швидкість. Отже, як було вже зазначено і вище, кавітаційний процес супроводжується значною зміною параметрів, які потребують уточнення для фіксованих технологічних середовищ із урахуванням зміни їхніх реологічних параметрів та акустичних параметрів кавітаційного апарату. В першу чергу важно оцінити моделі технологічних середовищ, що представляють дисперсні системи та за тим чи іншим

параметром здійснюють вплив на протікання процесу кавітаційної обробки.

1.3 Аналіз існуючих реологічних моделей дисперсних систем

Дисперсні системи, під дією прикладених до них зовнішніх зусиль, в процесі реалізації різних етапів їхньої кавітаційної обробки, проявляють пружні та зсувні деформації. Врахування пружних та зсувних деформацій обумовлюється реологічними властивостями, які у вигляді символів відображає фізична модель. До таких властивостей відносяться: пружність, в'язкість, пластичність, які в свою чергу відображають межі текучості, періоди релаксації, модулі пружності, коефіцієнти в'язкості, коефіцієнти зовнішнього та внутрішнього тертя і т. п. Процедура врахування вказаних властивостей полягає у виборі законів їх зміни, що відображається в математичній моделі із подальшим визначенням розрахункових залежностей, які і описують той чи інший процес досліджуваного дисперсного середовища. Найпростішими є три ідеалізовані моделі, що роздільно враховують реологічні властивості матеріалів і середовищ: пружні – пружна модель Гука (рис. 1.8, а); в'язкі – в'язка модель Ньютона (рис. 1.8, б); пластичні – пластична модель Сен-Венана (рис. 1.8, в). Найпростіші ідеалізовані моделі названі в честь їхніх авторів.

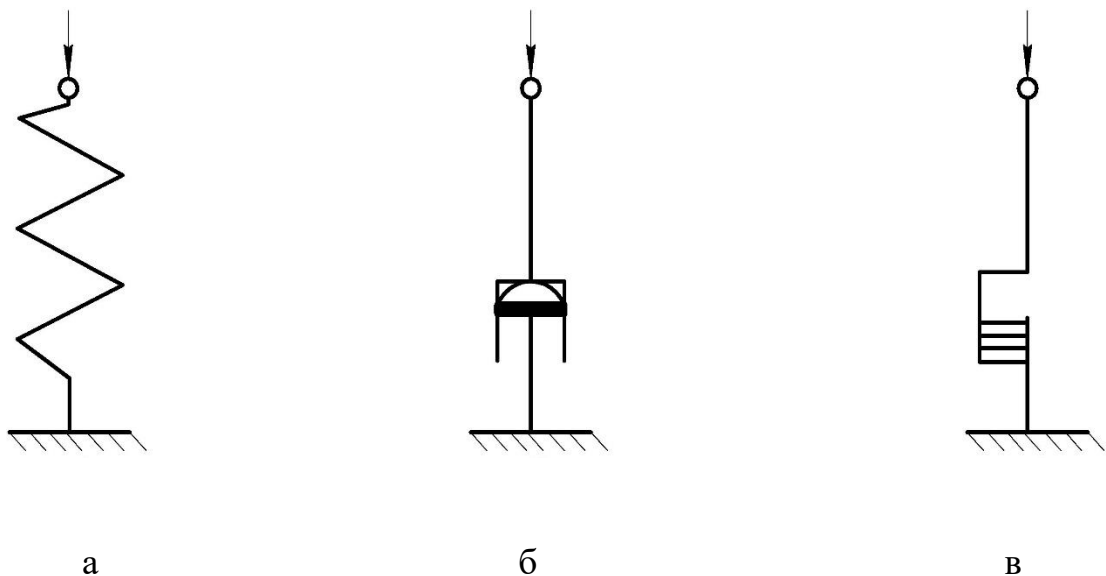


Рисунок 1.8 – Ідеалізовані фізико-механічні моделі середовищ

Пружні властивості середовища (див. рис. 1.8, а) представляються у вигляді лінійної (лінійна модель) або нелінійної (нелінійна модель) пружини. В ідеально пружному середовищі енергія витрачається на деформацію під час навантаження і повертається внаслідок розвантаження. В такому випадку використовується закон Гука.

Він в межах пружності за малих деформацій описує поведінку кристалічних й аморфних тіл, а також рідин за ізотропного розширення-стискування:

$$p = E_v \Delta, \quad (1.5)$$

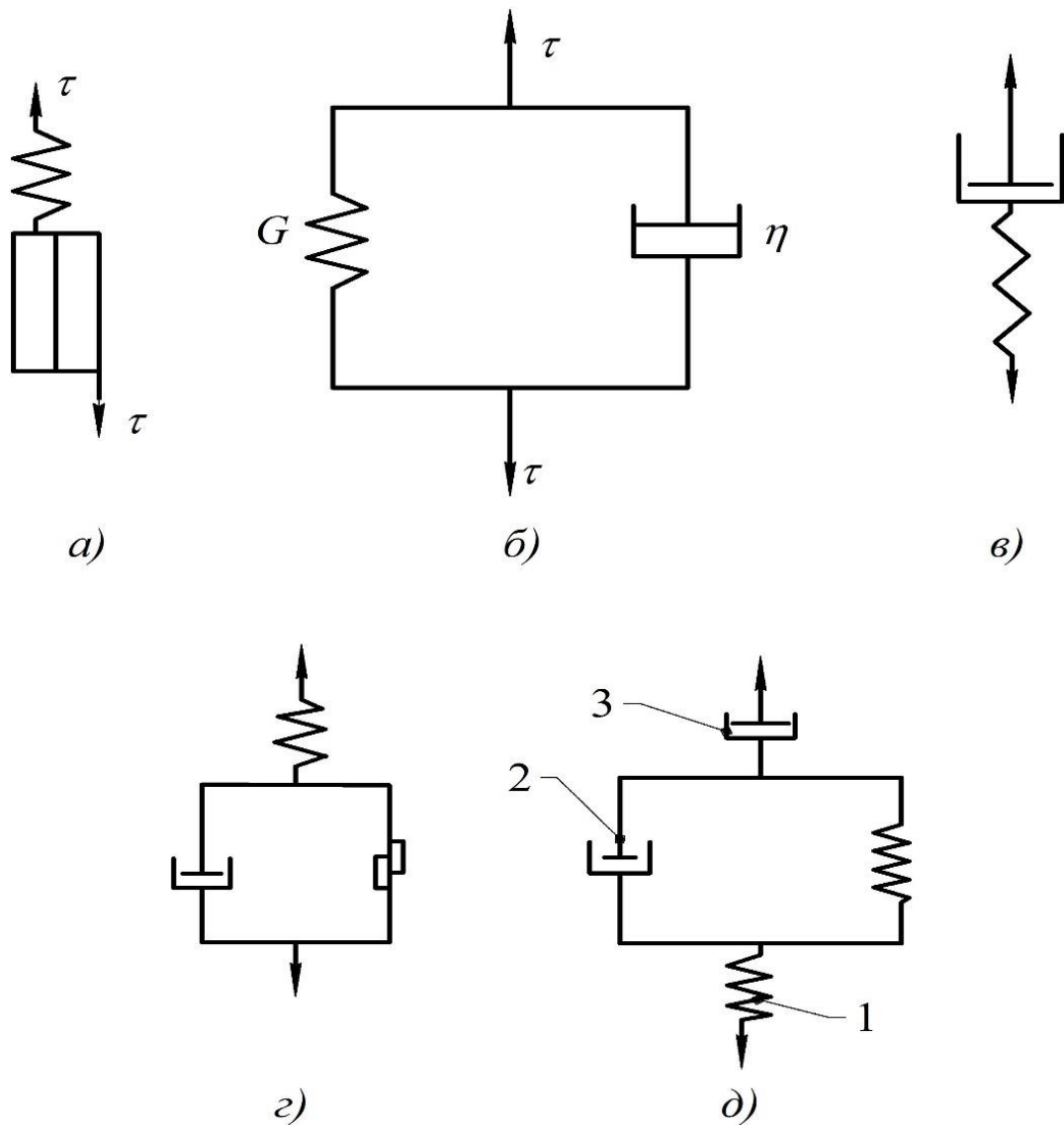
де P – гідростатичний тиск, Па; E_v – модуль об'ємного розширення (стискування), Па; Δ – відносне об'ємне розширення-стиск (відношення зміни об'єму до об'єму у вихідному стані).

Рівняння (1.5) справедливе тільки для лінійної моделі.

Модель ньютонівської системи (див. рис. 1.8, б) являє собою демпфер, складається з поршня, який переміщується в циліндрі з рідиною. Під час переміщення поршня рідина крізь отвори між поршнем і циліндром перетікає з однієї частини циліндра в іншу, а опір при цьому вважають пропорційним швидкості поршня. Ідеально в'язка рідина характеризується тим, що в ній напруження пропорційні швидкості деформації. В'язка течія відбувається внаслідок дії будь-яких сил, проте швидкість деформації зменшується за умови зменшення сил, а за їхньої відсутності дорівнює нулю. Для таких рідин в'язкість є постійною, пропорційною напруженню зсуву. Закон Ньютона описує поведінку в'язко-молекулярних рідин під час зсуву і поздовжньої течії.

Ідеально пластичне середовище Сен-Венана (див. рис. 1.8, в) уявляється у вигляді елемента, який складається з двох притиснутих одна до одної пластинок. За відносного переміщення пластин між ними виникає постійна сила тертя, яка не залежить від нормальної сили. Цілком очевидно, що реальні середовища відрізняються від «ідеального» реологічного середовища і в процесі їхньої обробки проявляються, як пружні, так і в'язкі та пластичні

властивості. Залишається невизначеним, в якій степені потрібно враховувати в реальних моделях ці три властивості в лінійному чи нелінійному вигляді. Для побудови моделі символи, що відображають ті чи інші властивості, з'єднують між собою послідовно або паралельно. До таких належать ряд основних моделей (рис. 1.9).



a – модель пружно-пластичного тіла; *б* – модель Кельвіна-Фойгта; *в* – модель Максвелла; *г* – модель Шведова-Бінгама; *д* – модель в'язко-пружності

Рисунок 1.9 – Реологічні моделі середовищ, що отримані шляхом з'єднання між собою послідовно або паралельно елементів пружності, пластичності та в'язкості

Можливі й інші з'єднання елементів між собою, що обумовлюється необхідністю врахування тих чи інших властивостей реального технологічного середовища.

На базі цих та інших найбільш відомих моделей [101–108, 110–114, 120, 127, 128, 131–135, 137, 158–178, 258–272, 275–277, 294–319, 358–364], розглянемо сутність їх утворення, акцентуючи основну увагу на зміні їхніх параметрів в процесі навантаження. Ці відомості являються важливою інформацією для використання при кавітаційній обробці різних за складом технологічних середовищ.

Перш за все варто з'ясувати сутність визначення та врахування пружно-пластично-в'язких властивостей дисперсних систем і розчинів. Для визначення пружно-пластично-в'язких властивостей дисперсних систем і розчинів застосовується експериментальне визначення груп кривих деформації чистого зсуву [117]. Дослідження пружно-пластично-в'язких властивостей дисперсних систем по кривим кінетики деформації були визначені основні їхні характеристики [62, 119]. Теорія загального підходу до цієї проблеми описана в роботах [117, 119, 148, 149]. Зазначається, що найбільш важливим реологічним показником властивостей матеріалу є залежність швидкості деформації від напруження. Для більшості технологічних середовищ ці залежності мають складний характер. В цих випадках реологічні властивості характеризуються кривою залежності деформації від напруження.

Для пружно-пластичного середовища (рис. 1.10, а) характерна така послідовність його поведінки: при $\tau < \tau_1$ відбувається пружна деформація матеріалу, а при $\tau = \tau_1$ – пластична текучість (рис. 1.9, б).

Середовище Сен-Венана не починає рухатися доти, доки напруження зсуву не стане більшим від критичного значення – межі текучості (див. рис. 1.10, б), що має назву граничне напруження зсуву. За цієї умови, елемент може рухатися із будь-якою швидкістю. Така модель характерна для суто пластичних технологічних середовищ.

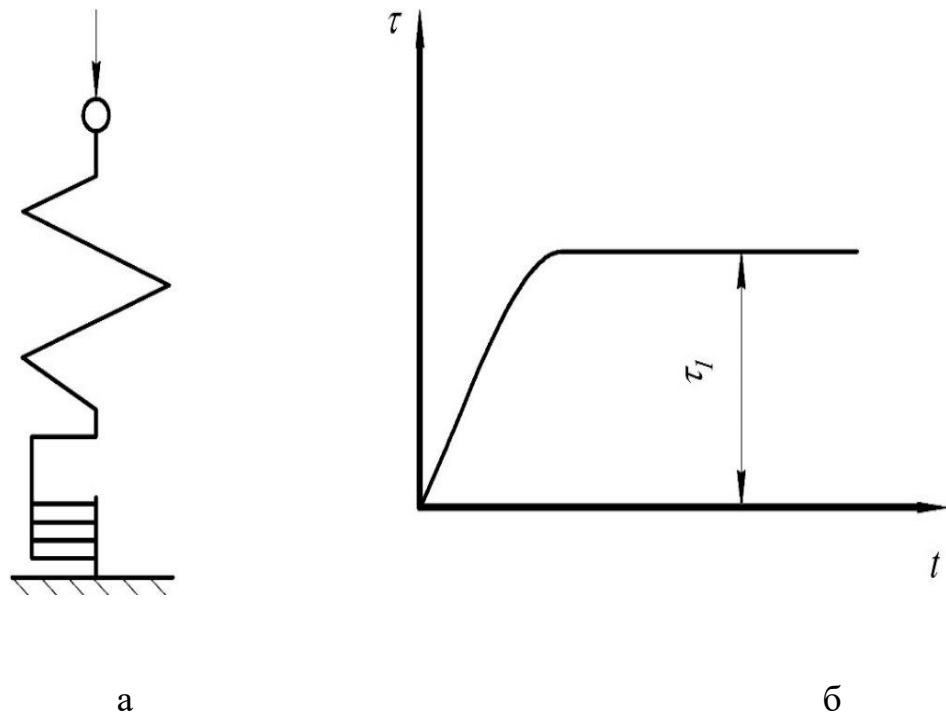


Рисунок 1.10 – Модель пружно-пластичного середовища (а) та діаграма зміни напруження у часі (б)

Як було зазначено вище, при паралельному з'єднанні пружного елемента Гука з модулем пружності E і в'язкого елемента Ньютона з в'язкістю η отримують в'язко – пружну модель Кельвіна-Фойгта [97] (рис. 1.11, а).

Зміна напруження у часі τ - t (див. рис. 1.11, б) та деформації у часі γ - t (див. рис. 1.11, в) засвідчують, що під дією розтягувального зусилля пружина подовжується, а поршень буде рухатися в рідині. Цей рух поршня пов'язаний з в'язким опором рідини, тому що повне розтягування пружини виникає не одразу. Коли навантаження зникло, пружина стискається до початкової довжини, але це потребує часу внаслідок в'язкого опору рідини.

Реологічне рівняння моделі Кельвіна-Фойгта має вигляд [117]:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}, \quad (1.6)$$

де G – модуль пружності при зсуві, Па; γ – кутова деформація; η – ньютонівська в'язкість, Па·с.

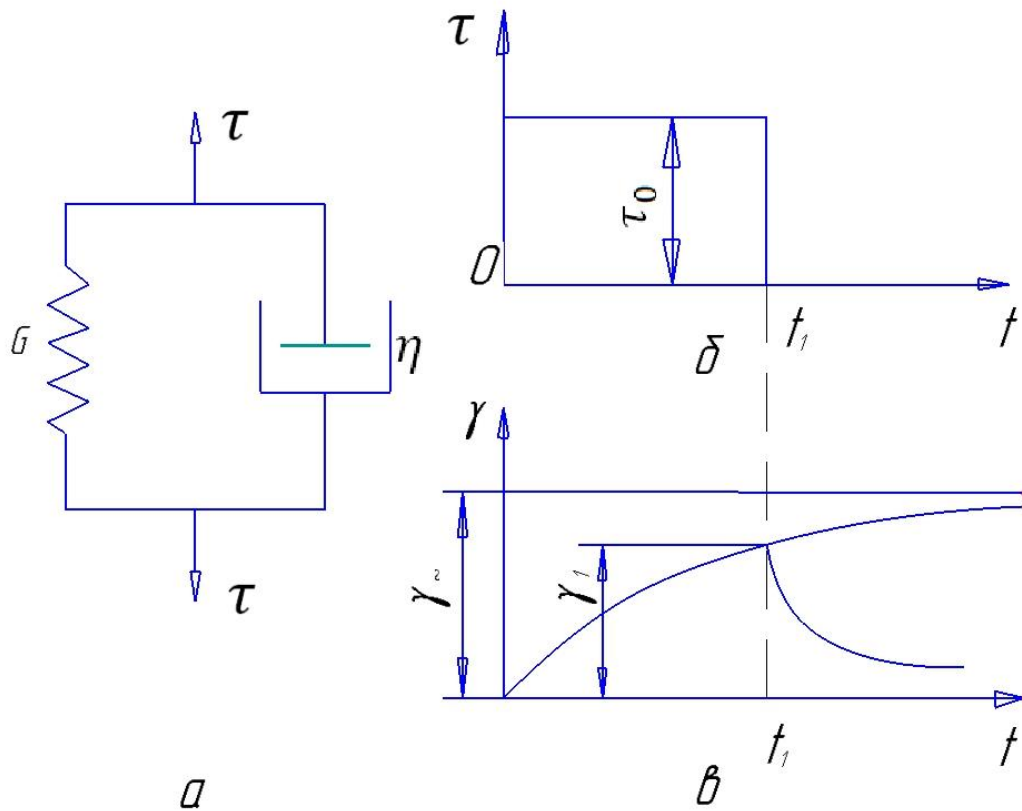


Рисунок 1.11 – Модель Кельвіна-Фойгта (а), діаграми зміни напруження у часі τ - t (б) та швидкості деформації у часі γ - t (в)

При $\tau = \text{const}$ – розвиток деформації у часі (рис. 1.11, б) описується рівнянням [117]:

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} \left(1 - e^{-\frac{G\tau}{\eta}} \right), \quad (1.7)$$

де γ – деформація в момент часу $t \leq t_1$.

Якщо напруження τ_0 не зняти, то при $t \rightarrow \infty$ деформація $\gamma_\infty \rightarrow \frac{\tau_0}{G}$, тобто прямує до деякого значення. Модель Кельвіна-Фойгта відображає явище пружної післядії, котре представляє собою зміну пружної деформації в часі, коли вона чи постійно зростає до деякої межі після прикладення навантаження, чи поступово зменшується. Відношення $\frac{\eta}{G} = T_\eta$, називають часом запізнювання чи пружної післядії [119]. В момент часу $t = T_\eta$ деформація за рівнянням (1.7):

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} \left(1 - \frac{1}{e}\right) \approx 0,633\gamma_\infty. \quad (1.8)$$

Отже, час запізнення (пружної післядії) дорівнює часу, під час якого деформація при постійному напруженні досягає 0,633 від її рівнодійного значення. Після зникнення напруження (при $t > t_1$) зміна деформації описується рівнянням [117]:

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} \left(e^{\frac{Gt_1}{\eta}} - 1 \right) e^{-\frac{Gt}{\eta}}. \quad (1.9)$$

З рівняння слідує, що деформація дорівнює нулю тільки при $t = \infty$, тобто в будь який час в матеріалі мається деяка остаточна деформація. Це цікавий результат для певного класу матеріалів та розчинів. Дана модель широко застосовується в середовищах з частотною залежністю сил опору (дисипативні властивості) від частоти.

При кавітаційній обробці певних рідинних середовищ цю модель застосовано в роботах [76, 84, 98, 100, 101]. У якості моделі використовується модель Кельвіна-Фойгта для опису поведінки розчинів і сумішей. Застосування цієї моделі для обробки середовищ акустичним методом потребує уточнення в частині складу дисперсного середовища, відповідності зміни дисипативних властивостей та пружних властивостей за лінійним чи нелінійним законами. Порушення лінійності зміни дисипативних властивостей та пружних властивостей відмічається в деяких дослідженнях [107, 113, 144].

Модель в'язко-пружного середовища (модель Максвела) (рис. 1.12, а) відрізняється від моделі Кельвіна-Фойгта однаковим навантаженням τ на пружний та дисипативний елемент моделі.

За моделлю Максвела середовище поводить себе як пружне чи пластичне в залежності від відношення часу релаксації до часу силової дії на це середовище.

Отже, якщо під дією миттєвого зусилля пружина розтягується, а потім миттєво напруження зникає, то поршень не встигає рухатися і система поводить себе як пружне середовище. З іншого боку, якщо підтримувати

розтягування пружини постійно, то вона поступово релаксує, переміщуючи поршень вгору і система поводить себе майже як ньютонівська рідина.

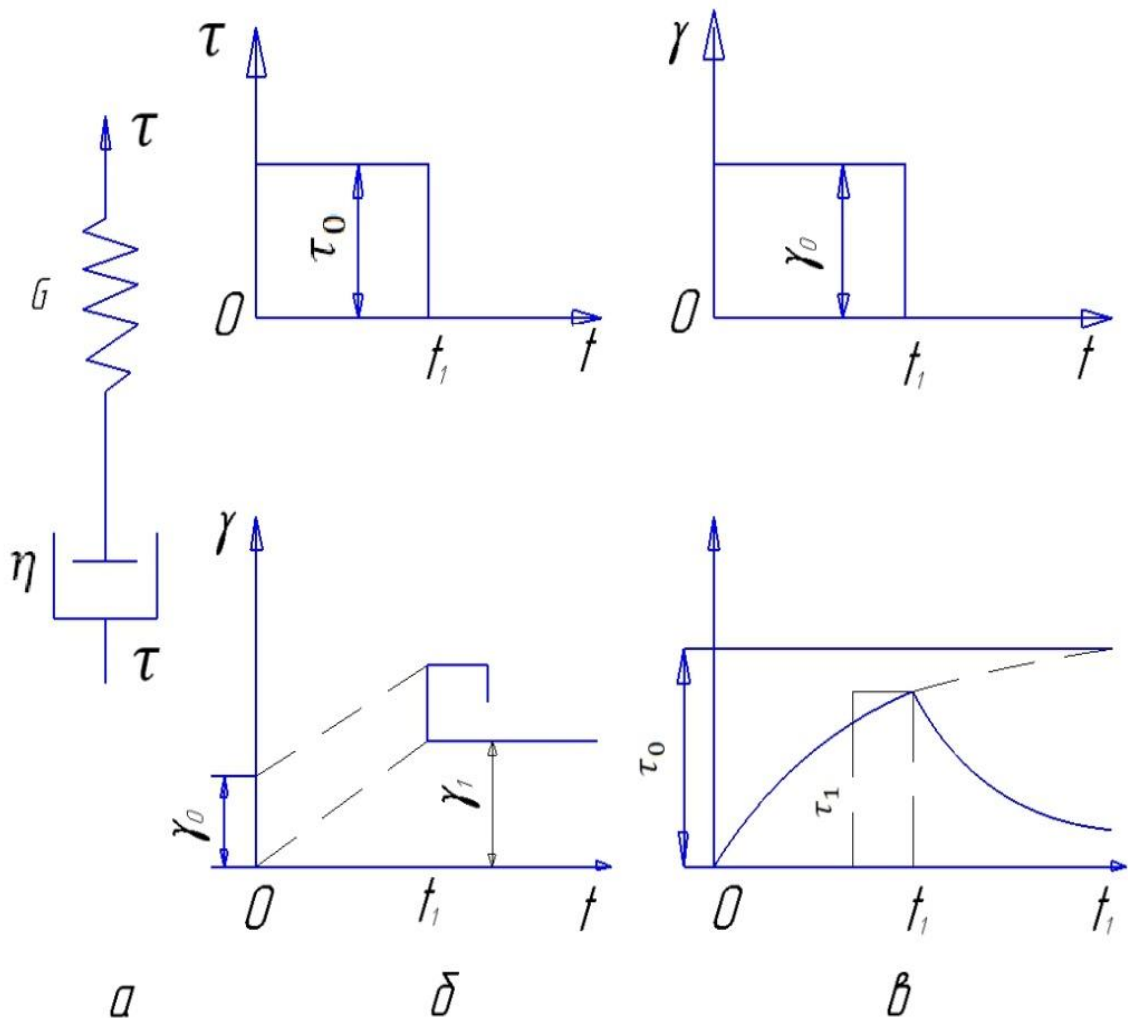


Рисунок 1.12 – Модель Максвела (а), діаграми зміни напруження у часі τ - t (б) та швидкості деформації у часі $\dot{\gamma}$ – t (в)

Звідси реологічне рівняння моделі Максвела має вигляд [117]:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta}. \quad (1.10)$$

За умови, що $\tau = \text{const}$:

$$\gamma = \gamma_0 + \tau \left[\frac{1}{G} + \frac{t-t_0}{\eta} \right], \quad (1.11)$$

де γ_0 – деформація ньютонівського елемента при $t=t_0$.

Якщо в момент часу $t_0=0$ до середовища прикладене постійне напруження τ_0 , котре зникає при $t=t_1$, то текуча деформація визначається за залежністю [117]:

$$\gamma_1 = \tau_0 \left(\frac{1}{G} + \frac{t}{\eta} \right). \quad (1.12)$$

Із рівняння (1.11) видно, що при $t_0=0$ деформація досягає величини $\gamma_0 = \frac{\tau_0}{G}$, а потім зростає за лінійним законом. При $t=t_1$ деформація досягає значення

$$\gamma_1 = \frac{\tau_0}{G} + \tau_0 t_1 / \eta. \quad (1.13)$$

При $t > t_1$ деформація частково обернена і дорівнює $\tau_0 t_1 / \eta$.

Розглянемо випадок деформації середовища при постійній швидкості $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ до моменту t_1 (рис. 1.12, в), потім процес деформації миттєво припиняється ($\dot{\gamma} = 0$ при $t > t_1$). Зміна напруження в часі при $\tau_0 = 0$, $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$ має вигляд [117]:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}_0 \left(1 - e^{-\frac{Gt}{\eta}} \right). \quad (1.14)$$

Із цього слідує, що при $\dot{\gamma} = \text{const}$ напруження не залишається постійним і досягає рівноважного значення при $t \rightarrow \infty$. При $t > t_1$ швидкість деформації стає рівною нулю, а деформація залишається постійною. В цьому випадку зміна напруження в часі рівна:

$$\tau = \tau_1 e^{(t_1-t)/T_p}, \quad (1.15)$$

де $T_p = \frac{\eta}{G}$ – час (період) релаксації, с.

Рівняння (1.15) показує, що при постійній деформації тіла Максвела напруження в часі зменшується. Це явище називають релаксацією напружень [117]. Тому, час релаксації дорівнює часу, протягом якого початкове напруження при постійній деформації зменшується в $e=2,72$ рази. Рівняння (1.15) експериментально підтверджується для деяких аморфних твердих та рідких тіл [117]. Релаксація напружень при постійній деформації загалом виражають через час релаксації T_p і модуль зсуву G , перетворюючи формулу (1.15) до виду [119]:

$$G(t) = Ge^{(t_1-t)/T_p}. \quad (1.16)$$

Функція $G(t)$ представляє собою релаксуючий модуль при зсуві, котрий відрізняється від постійного модуля G . Значення T_p та G визначають за кривими залежності логарифма $G(t)$ від часу. При з'єднанні паралельно елементів Ньютона з в'язкістю η і Сен-Венана з межею текучості τ_τ отримують модель в'язко-пружного середовища Шведова-Бінгама (див. рис. 1.9, г). Якщо $\tau \leq \tau_\tau$, то середовище поводить себе як абсолютно тверде недеформоване тіло.

Реологічне рівняння в'язко-пружного середовища при $\tau > \tau_\tau$ має вигляд:

$$\gamma = \frac{(\tau - \tau_\tau)}{\eta}. \quad (1.17)$$

Розглядаючи цю модель з точки зору її застосування можна зазначити, що є матеріали, які при певних співвідношеннях в'язкого опору відображають реальну картину процесу деформування середовища.

Модель Бінгама (рис. 1.13, а) складається з елементів Гука з модулем пружності G , Ньютона з в'язкістю η і Сен-Венана з межею текучості τ_τ .

Модель Шведова (рис. 1.13, б) складається з елементів Гука з модулем пружності G_H . Сен-Венана з модулем пружності G_M і в'язкістю η .

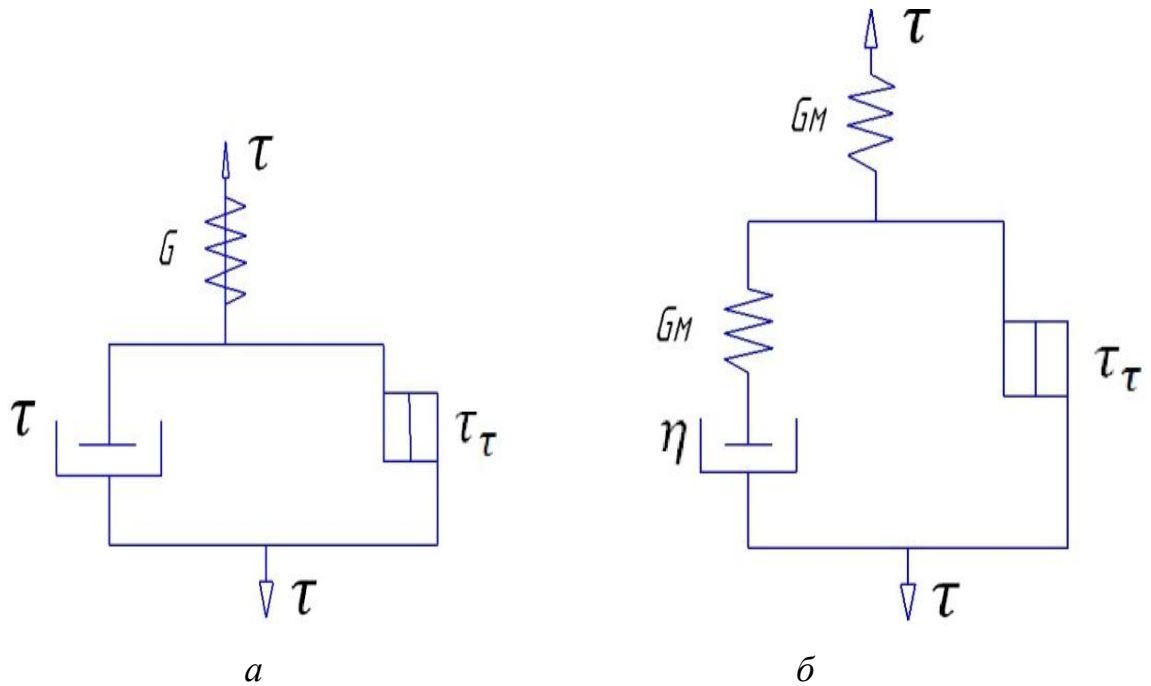
Як слідує із наведеної моделі (рис. 1.13, а) елементи Ньютона і Сен-Венана з'єднані паралельно, а потім ці вже з'єднані елементи послідовно з'єднуються з елементом Гука. Під дією напруження $\tau < \tau_\tau$ модель Бінгама має тільки пружну деформацію.

Реологічне рівняння цієї моделі при $\tau > \tau_\tau$ має вигляд [117].

$$\gamma = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau - \tau_\tau}{\eta}. \quad (1.18)$$

Модель Шведова відрізняється від моделі Бінгама тим, що паралельно моделі Сен-Венана приєднана модель Максвела, а у моделі Бінгама – елемент Ньютона. При $\tau \leq \tau_\tau$ деформація моделі Шведова відбувається тільки завдяки елементу Гука. При $\tau > \tau_\tau$ деформуються всі елементи моделі. Реологічне рівняння моделі Шведова в диференціальній формі має вид [117]:

$$\gamma = \dot{\tau} \left(\frac{1}{G_H} + \frac{1}{G_M} \right) + \frac{\tau - \tau_\tau}{\eta}. \quad (1.19)$$



а – Бінгама, б – Шведова

Рисунок 1.13– Реологічні моделі

Модель Максвела-Томсона представляє собою модель Кельвіна-Фойгта, до якої послідовно приєднаний елемент Гука (рис. 1.14, а). Цю модель часто називають моделлю стандартного в'язко-пружного тіла [119].

Рівняння деформування моделі Максвела-Томсона має вигляд [117]:

$$\tau + T_p \dot{\tau} = G\gamma + T_p G_2 \dot{\gamma}, \quad (1.20)$$

де G – модуль пружності, Па; G_2 – миттєвий модуль пружності, Па; T_p – час релаксації, с.

$$T_p = \frac{\eta}{(G_1 + G_2)}; G = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2}. \quad (1.21)$$

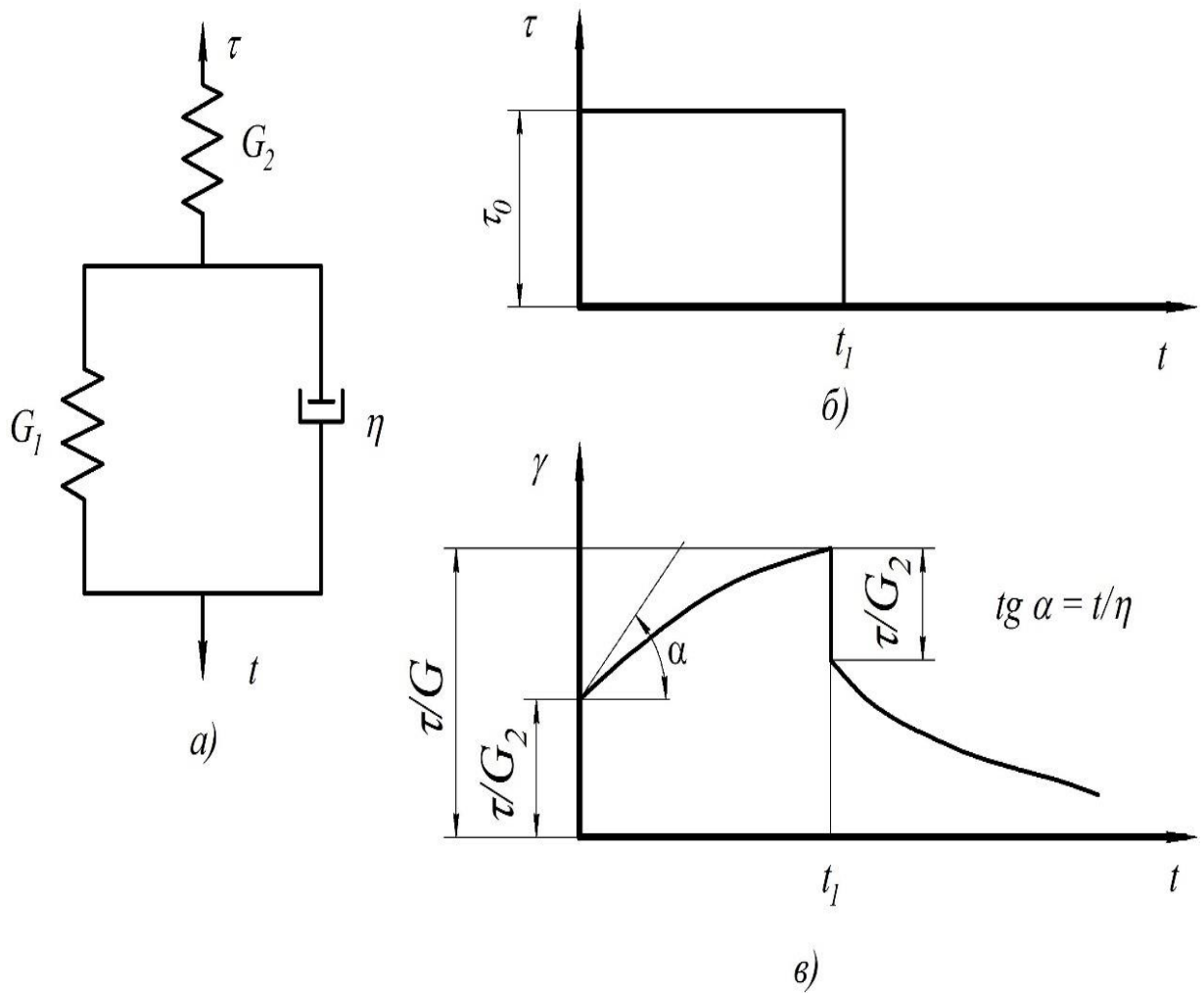


Рисунок 1.14 – Модель Максвела-Томсона (а), діаграми зміни напруження у часі τ - t (б) та швидкості деформації у часі γ – t (в)

Узагальнені механічні моделі Кельвіна і Максвела (рис. 1.15) поєднують у собі властивості в'язкості та пружності, тому їх деформація під дією напруження визначається як сума m складових елементів тіла Кельвіна-Фойгта і тіла Максвела.

Реологічне рівняння узагальненої моделі Кельвіна (рис. 1.15, а) має вид [119]:

$$\gamma = \sum_{i=1}^m \gamma_{i0} e^{\frac{t_0-t}{T_{zi}}} + \int_{t_0}^t \tau(x) \sum_{i=1}^m (1/\eta_i) \times e^{(x-t)/T_{zi}} dx. \quad (1.22)$$

Узагальнена модель Кельвіна при $G_i \neq 0$ являється в'язко-пружним

середовищем, не володіючи миттєвою пружністю. Однак модель може містити один ($G_i = 0$ чи $\eta_i = 0$) або два «вироджених» елементи ($G_i = 0, \eta_i = 0$). Якщо є один вироджений елемент, у якого $\eta_i = 0$, то середовище під дією напруження отримає миттєву деформацію.

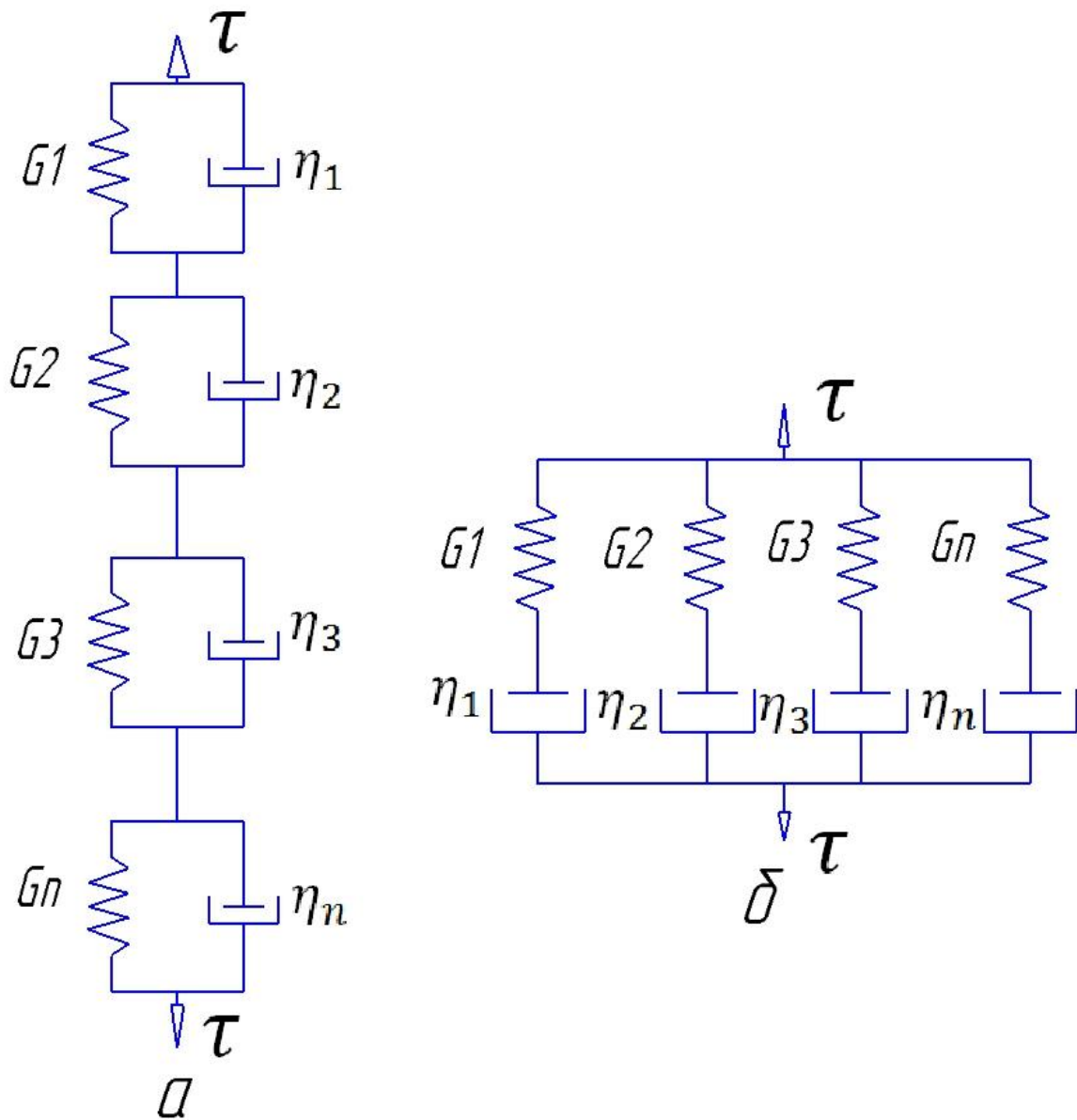


Рисунок 1.15 – Узагальнені моделі Кельвіна (а) і Максвела (б)

При $G_i=0$ деформація середовища необмежено збільшується, тобто в цьому випадку середовище являється в'язко-пружною рідиною, що не може миттєво деформуватися. При наявності двох «вироджених» елементів ($G_i =$

$0, \eta_i = 0$) середовище являється в'язко-пружною рідиною, здатною до миттєвої деформації.

Реологічне рівняння узагальненої моделі Максвелла (рис. 1.15, б) у формі загального напруження має вид [119]:

$$\tau = \sum_{i=1}^m \tau_{t0} e^{\frac{t_0-t}{T_{pi}}} + \int_{t_0}^t \dot{\gamma}(x) \sum_{i=1}^m G_i e^{(x-t)/T_{pi}} dx. \quad (1.23)$$

При $G_i \neq 0$ і $\eta_i \neq 0$ узагальнене середовище Максвелла являється в'язко-пружною рідиною, здатною до миттєвої пружної деформації. Якщо мається один «вироджений» елемент, то при $\eta_i = \infty$ узагальнене середовище являється в'язко-пружним, здатним до деякої миттєвої деформації; при $G_i = \infty$ – в'язко-пружною рідиною, не здатною до миттєвої деформації. При наявності двох «вироджених» елементів ($G_i = \infty, \eta_i = \infty$) середовище являється пружно-пластичним твердим тілом, не здатним до миттєвої пружної деформації.

В роботі [120] пропонується блочна механіко-реологічна модель кавітуючого середовища в якій блок А відповідає об'ємному розтягуванню тіла, блок Б – чистому зрушенню, блок В являє собою допоміжний вузол (рис. 1.16).

Практичне застосування такої системи моделей в рівняннях руху не представляється можливим, оскільки на певних ділянках процесу відсутні числові значення параметрів за яких здійснюється та чи інша операція. Приведені в описі кавітаційного процесу (блок Б) співвідношення величин напружень τ і τ_* із значеннями від 10^{-6} Па в разі води і 1 Па у випадку гліцерину до 10^{10} Па [120] в разі використання сталі не можуть слугувати у якості реального прикладу.

Чому так, оскільки ці матеріали різні за фізичними властивостями, за процесом кавітаційної обробки та за реологічними моделями. Наприклад, для сталі модель Кельвіна-Фойгта ні Максвелла не відображає реальну картину зміни напруженого стану, так як навіть для різних металів закони зміни

дисипативних характеристик різні [150, 151]. І дуже важливим фактором є час процесу, а він теж має різні значення в рамках навіть одного середовища при різних силових навантаженнях.

Разом з тим, на основі аналізу моделі (див. рис. 1.12) можна зробити наступний висновок. Середовище, яке підлягає кавітаційній обробці, представляє собою пружно-в'язко-пластичне тіло, що підтверджується в деяких інших роботах [101, 102, 104, 105, 108, 132, 133, 143, 144] більш простими моделями.

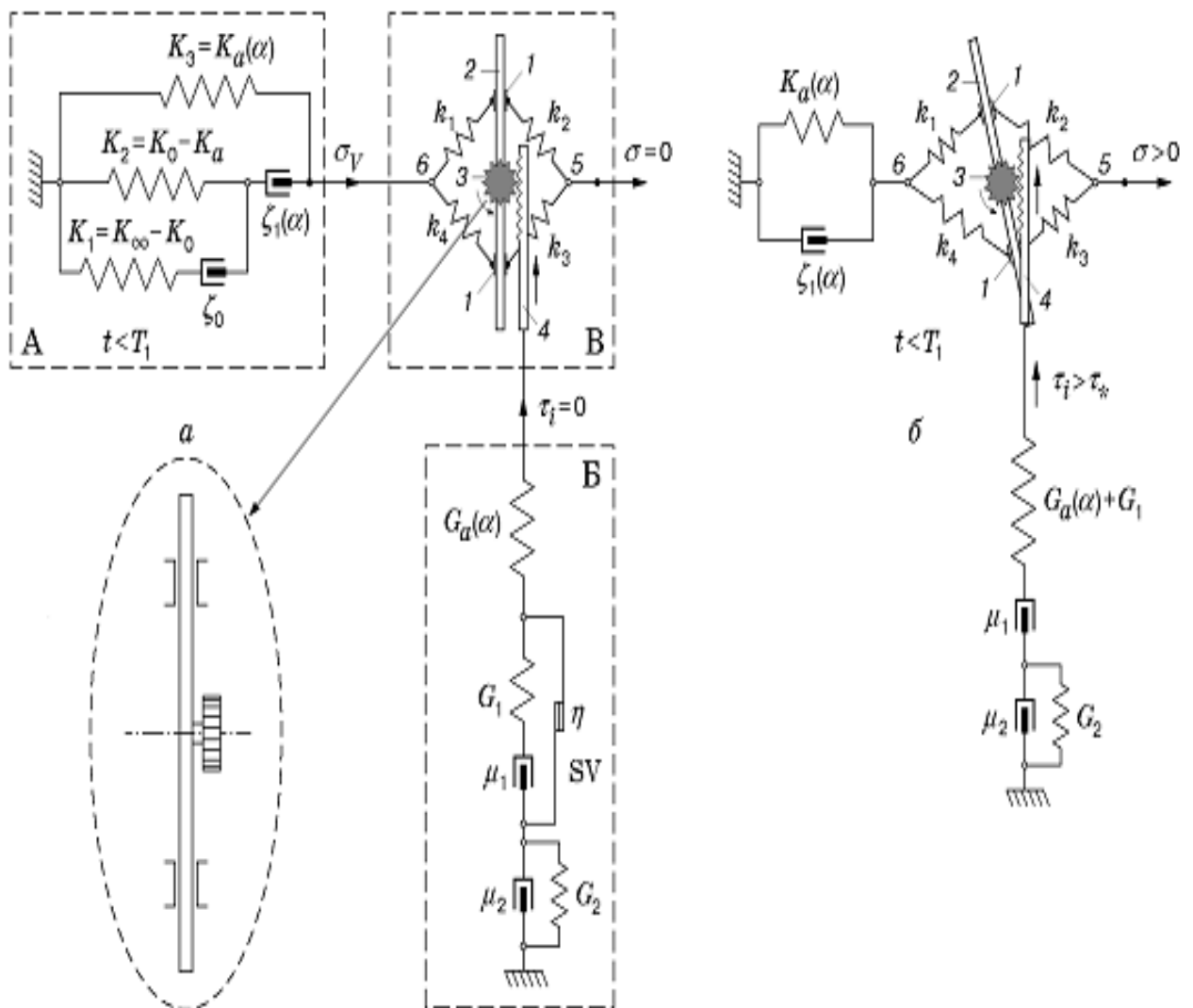


Рисунок 1.16 – Блочна механіко-реологічна модель кавітуючого середовища

В цілому, виконаний аналіз формування структури реологічних моделей та врахування складових характеристик моделей потребує їх корекції у відповідності до розгляду стадій протікання кавітаційної обробки конкретного середовища.

На етапі попереднього вибору можна застосовувати модель Кельвіна-Фойгта, для якої залежність між напруженням σ і деформацією ε має вигляд [101]:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}, \quad (1.25)$$

де E , η – постійні, що характеризують пружні та в'язкі властивості технологічного середовища.

Існує і інший підхід моделювання реологічних властивостей середовища. Він ґрунтується на використанні емпіричних залежностей, в яких деформації і швидкості деформацій пов'язані ступеневими або більш складними законами. Так, в роботі [148] зазначається, що для більшості дилатантних і псевдопластичних середовищ залежність механічного напруження від швидкості зсуву апроксимується наступною функцією:

$$\sigma = \alpha \dot{\gamma}^n, \quad (1.26)$$

де σ – напруження зсуву, с^{-1} , α – коефіцієнт консистенції, $\text{Па} \cdot \text{с}^{n-1}$, $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с^{-1} , n – безрозмірний показник нелінійності.

Для псевдопластичних середовищ $n < 1$, а для дилатантних $n > 1$. Поряд з показниками консистенції і нелінійності всі неньютонівські рідини характеризуються в'язкістю. Ці три показники (консистенції, нелінійності і в'язкості) однозначно впливають на визначення вдосконалених режимів ультразвукового методу обробки різних технологічних середовищ. Крім того, багато технологічних середовищ мають складну будову і в процесі обробки можуть розділятися по фазах і слідувати тому чи іншому закону залежно від рівня напружень і деформацій, температури і тисків.

Таким чином, виконаний огляд реологічних моделей, їх оцінка та аналіз засвідчує наступне.

У приведеному матеріалі відсутні методи моделювання технологічних середовищ для визначення акустичних та силових параметрів робочого процесу. Це зроблено усвідомлено. Такі дослідження виділені в окремий розділ з розглядом спільної моделі «акустичний апарат – технологічне середовище», складеної із підсистем – апарат і середовище в контексті визначення можливого взаємовпливу підсистем на робочий рух. І на цій основі розробити методологію та методи дослідження.

Із тої гами розглянутих моделей, що приводяться в літературних джерелах [101–108, 110–114, 120, 127, 128, 131, 132, 134, 135, 137, 160 – 169] для опису реологічних властивостей середовищ виявлено, що для методів ультразвукової обробки практично відсутні загальноприйняті чіткі відомості щодо можливого їх використання. Надалі важливим для обґрунтування та вибору розрахункових моделей реальних середовищ є аналіз існуючих аналітичних залежностей для визначення режимів та параметрів кавітаційного процесу.

1.4 Оцінка існуючих аналітичних залежностей для визначення режимів кавітаційного процесу

Математичний опис процесу стиснення кавітаційної бульбашки належить Релею. В своїх дослідженнях він враховував тільки інерційні сили:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = -\frac{P_0}{\rho}, \quad (1.27)$$

де R , P_0 і ρ – діаметр бульбашки, тиск і щільність відповідно.

Поверхневий натяг рідини, тиск парогазової суміші усередині бульбашки були враховані пізніше. Модифікацією рівняння Релея є рівняння Нолтінга-Неппайраса, яке описує швидкість руху границі парогазової бульбашки в рідині, яка не стискується і за відсутності в'язкості [127]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho_p} \left[P_0 - P_n - P \sin(\omega t) + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0 \quad (1.28)$$

Тиск, що створюється силами поверхневого натягу, обчислений за умови, що спад поверхневої енергії за рахунок зменшення розмірів бульбашки під дією сил поверхневого натягу дорівнює роботі, яку здійснюють при зміні об'єму газу. Тиск газу у рівнянні (1.28) змінюється по ізотермічному закону. Тиск пара в бульбашці зберігається постійним за умови, що розміри бульбашки змінюються порівняно повільно під дією зовнішніх сил. Зовнішній тиск, що діє на бульбашку в будь-який момент часу, визначається першим виразом, приведений в квадратних дужках рівняння (1.28). Це рівняння достатньо повно досліджено в роботах [59, 60, 74–75, 127, 157–158]. Його рішенням дано пояснення фізики процесу руху одиночної бульбашки, визначено діаметр бульбашки за умови зміни співвідношення R_0 до R_{\max} за адіабатичним законом. Вплив параметра R_{\max}/R_0 на ефективність захлопування бульбашки слідує також з простих енергетичних міркувань. У фазі розширення бульбашка набуває потенційну енергію W [143]:

$$W = P_c \left(\frac{3}{4} \pi R_{\max}^3 \right), \quad (1.29)$$

де P_c – усереднений тиск в навколишній рідині в процесі захлопування.

Число Рейнольдса пропонується використовувати як критерій переходу від стиснення бульбашки з нескінченно зростаючою швидкістю до її стиснення за нескінченний час [127]:

$$Re = \frac{R_0}{\mu} \sqrt{\frac{P_0}{\rho}}. \quad (1.30)$$

В цитованій роботі [127] зазначається, що при $Re > Re^*$ (мала в'язкість), де Re^* – деяке критичне число, швидкість поверхні бульбашки \dot{R} необмежено зростає. При $Re < Re^*$ (велика в'язкість) в'язкість сильно перешкоджає прискоренню середовища, сплескування бульбашки відбувається повільно, за нескінченний час. У проміжному випадку при $Re = Re^*$ бульбашка

захлопується за кінцевий час; швидкість при $R \rightarrow 0$ необмежено зростає, але слабкіше, ніж R^{-1} . Справедливість таких тверджень потребує уточнених значень параметрів, що входять у вираз (1.28).

Подальші дослідження були направлені намаганнями дослідників врахувати в'язкість середовища і в рівняннях руху бульбашки. Рівняння (1.28) доповнене відповідним членом [165,168,182,199]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[P_0 - P_n - P \sin(\omega t) + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\eta}{R} \frac{dR}{dt} - \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0 \quad (1.29)$$

Підтвердженням складності впливу в'язкості на протікання кавітаційного процесу є робота [139]. В ній зазначається, що сила, яка діє на бульбашку, залежить не тільки від параметрів руху в даний момент часу, але і від того, як рухалася бульбашка деякий час назад. Тобто проявляється так званий ефект «володіння пам'яттю», що виникає у в'язкому середовищі. В'язкість призводить до того, що локальні течії, викликані переміщенням бульбашки, поступово загасають. Але відбувається це не миттєво, а значить, ці течії встигнуть ще вплинути і на майбутній рух бульбашки. Така неоднозначність впливу в'язкості на кавітаційний процес обробки технологічного середовища засвідчує про важливість оцінки цього впливу [28]. Як і варто було очікувати, в'язкість технологічного середовища є суттєвим фактором впливу на протікання процесу стиснення бульбашок [28, 142]. Потребується вибір такої розрахункової моделі, яка з достатньою точністю описує процеси, що відбуваються на всіх стадіях руху ансамблю бульбашок. Важливим моментом вибору розрахункової моделі бульбашок є виявлення, які явища проявляються в момент їхнього сплескування. У роботах [143, 144], зазначається, що при сплескуванні бульбашки в її центрі відбувається формування ударної хвилі, а температура при цьому сягає мільйони градусів. У роботі [145] цей факт не підтверджується, а в [146 – 148] відмічається малий вплив ударної хвилі.

Із урахуванням можливого стискування середовища, рівняння (1.29)

перетворено до виду [149]:

$$R \left(1 - \frac{dR/dt}{c_0} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{dR/dt}{c_0} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} P_K + \frac{R dR/dt}{\rho c_0} \left(1 - \frac{dR/dt}{c_0} \right) \frac{dP(R)}{dt} = 0, \quad (1.30)$$

де

$$P_K = P_0 - P_{II} - P \sin(\omega t) + \frac{4\eta dR/dt}{R} + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma}.$$

Рівняння (1.30) є нелінійним і в аналітичному вигляді його рішення може бути здійснено лише за допомогою чисельних методів, що і було зроблено авторами робіт [125, 168]. Так, за допомогою чисельного інтегрування методом Рунге-Кутта, з урахуванням початкових умов у вигляді: $R = R_0$ і $dR/dt = 0$ [98, 99, 125] отримано сімейство кривих залежності відносного радіуса бульбашки R/R_0 від безрозмірного часу ωt (рис. 1.17).

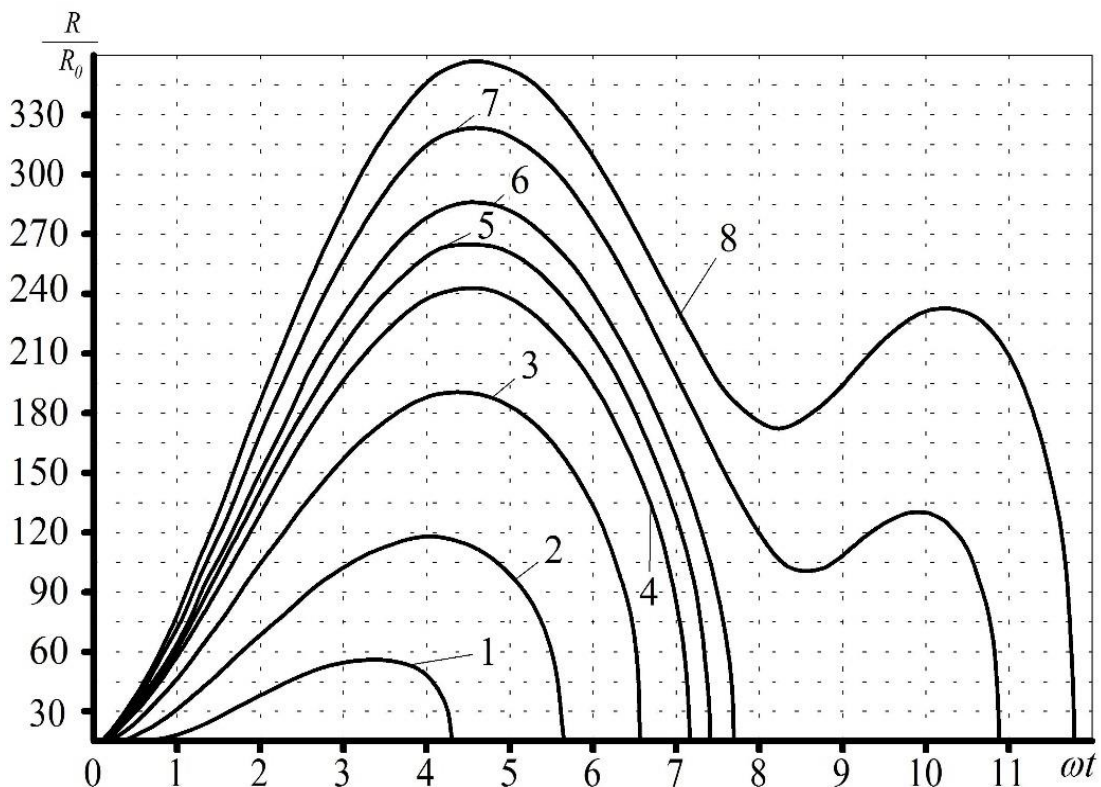


Рисунок 1.17 – Зміна радіуса кавітаційної бульбашки в залежності від часу

У якості вихідних параметрів прийнято: початковий радіус бульбашки $R_0 = 10^{-6}$ м, температура $t = 20^\circ\text{C}$, атмосферний тиск $P_0 = 10^5$ Па, частота акустичних коливань $f = 22$ кГц. Змінним параметром отриманого сімейства кривих (див. рис. 1.17) є амплітуда звукового тиску: 1 – амплітуда звукового тиску $P = 2 \cdot 10^5$ Па; 2 – $P = 4 \cdot 10^5$ Па; 3 – $P = 6 \cdot 10^5$ Па; 4 – $P = 8 \cdot 10^5$ Па; 5 – $P = 10 \cdot 10^5$ Па; 6 – $P = 12 \cdot 10^5$ Па; 7 – $P = 14 \cdot 10^5$ Па; 8 – $P = 16 \cdot 10^5$ Па.

Подібні графіки приведені також і в роботах [73, 99]. Не акцентуючи увагу на характер зміни приведених графіків, можна відмітити, що збільшення максимального радіуса кавітаційної бульбашки прямо пропорційно амплітуді звукового тиску. Стискування кавітаційної бульбашки на незначну величину було теоретично досліджено в роботі [173]. Автори роботи [174] розвили цю теорію для несферичних бульбашок, використовуючи метод співпадаючих асимптотичних розкладень. Моделювання динаміки бульбашок здійснювалося за умови їхнього знаходження біля жорсткого граничного шару, використовуючи теорію [173].

Разом з тим дані щодо складових тиску не приведені, що не дає можливості оцінити отримані результати. Адже до важливих складових звукового тиску, як і всього опору середовища, відноситься щільність середовища ρ_k і швидкість розповсюдження хвиль c_k [170-176]. Добуток цих параметрів $\rho_k c_k$ отримав назву хвильового опору. В техніці ультразвуку можливі наступні способи узгодження імпедансів [175, 176]: за допомогою проміжної узгоджуючої ланки (чи декількох), акустичні властивості якої постійні по всій довжині; за допомогою проміжної узгоджуючої ланки визначеної довжини з плавно (за певним законом) змінними характеристиками.

Хвильовий опір середовища на дію акустичного апарату представляє собою відношення акустичного тиску P_a до коливальної швидкості v частинок середовища:

$$Z_a = \pm P_a / v. \quad (1.31)$$

Важливість знання коефіцієнта Z_a полягає в тому, що він є важливою характеристикою взаємодії системи «акустичний апарат – середовище», не тільки, як опір, а як і характеристика хвильового руху. Дійсно, якщо на шляху розповсюдження акустичної хвилі є взаємодія границі системи "апарат - середовище", що має інші параметри, то в середовище переходить тільки частина потужності хвилі, а друга частина буде відбитою від межі контакту до апарату.

Тому очевидною задачею ефективного акустичного апарату є така його конструкція, яка забезпечує передачу максимальної енергії для реалізації кавітаційного процесу. Саме тому в формулі (1.31) варто враховувати знаки: верхній (плюс) ототожнює хвилю, що пройшла від апарату в середовище (падаюча хвиля), а нижній (мінус) для хвилі, що йде в зворотному напрямку, тобто повертається в апарат (відбита від границі системи «апарат – технологічне середовище» хвиля).

Очевидно, що для ефективної передачі енергії акустичної хвилі властивості апарату і середовища мають бути узгоджені між собою. Ця узгодженість полягає в тому, що їхні хвильові опори мають бути однакові, що в реальних умовах процесу кавітації практично неможливо. Дійсно, акустичний опір для твердих матеріалів, з яких виготовляється робочий орган акустичного апарату, та опір сумішами, суттєво відрізняються між собою.

Наприклад, такий твердий матеріал, як сапфір, має акустичний опір для

повздовжніх хвиль: $Z_a = 44,3 \cdot 10^6 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а для води $Z_a = 1,5 \cdot 10^6 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$, для повітря $Z_a = 4,27 \cdot 10^2 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [171].

Порівнюючи ці цифрові значення, стає очевидним те, що для вирішення задач раціонального конструювання акустичного апарату та визначення його параметрів необхідно аналітично дослідити послідовність акустичного узгодження хвильового опору апарату та технологічного середовища з метою отримання умови максимальної передачі енергії до оброблювального середовища.

1.5 Огляд та оцінка конструктивних та технологічних параметрів акустичних апаратів

Метою даного огляду є оцінка існуючих конструктивних та технологічних параметрів акустичних апаратів у галузі обробки ультразвуком, щоб показати нинішню ситуацію та визначити напрямки перспективного розвитку потужної ультразвукової техніки, як інноваційної технології у багатьох галузях промисловості.

Основними конструктивними елементами будь якого ультразвукового технологічного апарату є генератор та ультразвукова коливальна система, яка і передає енергію в оброблювальне середовище (рис. 1.18).

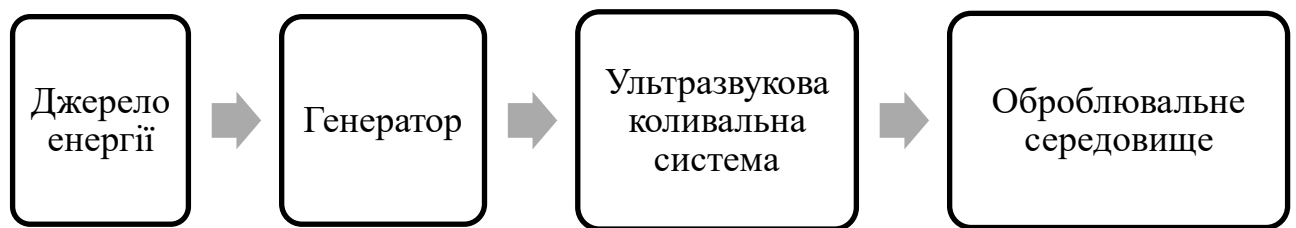
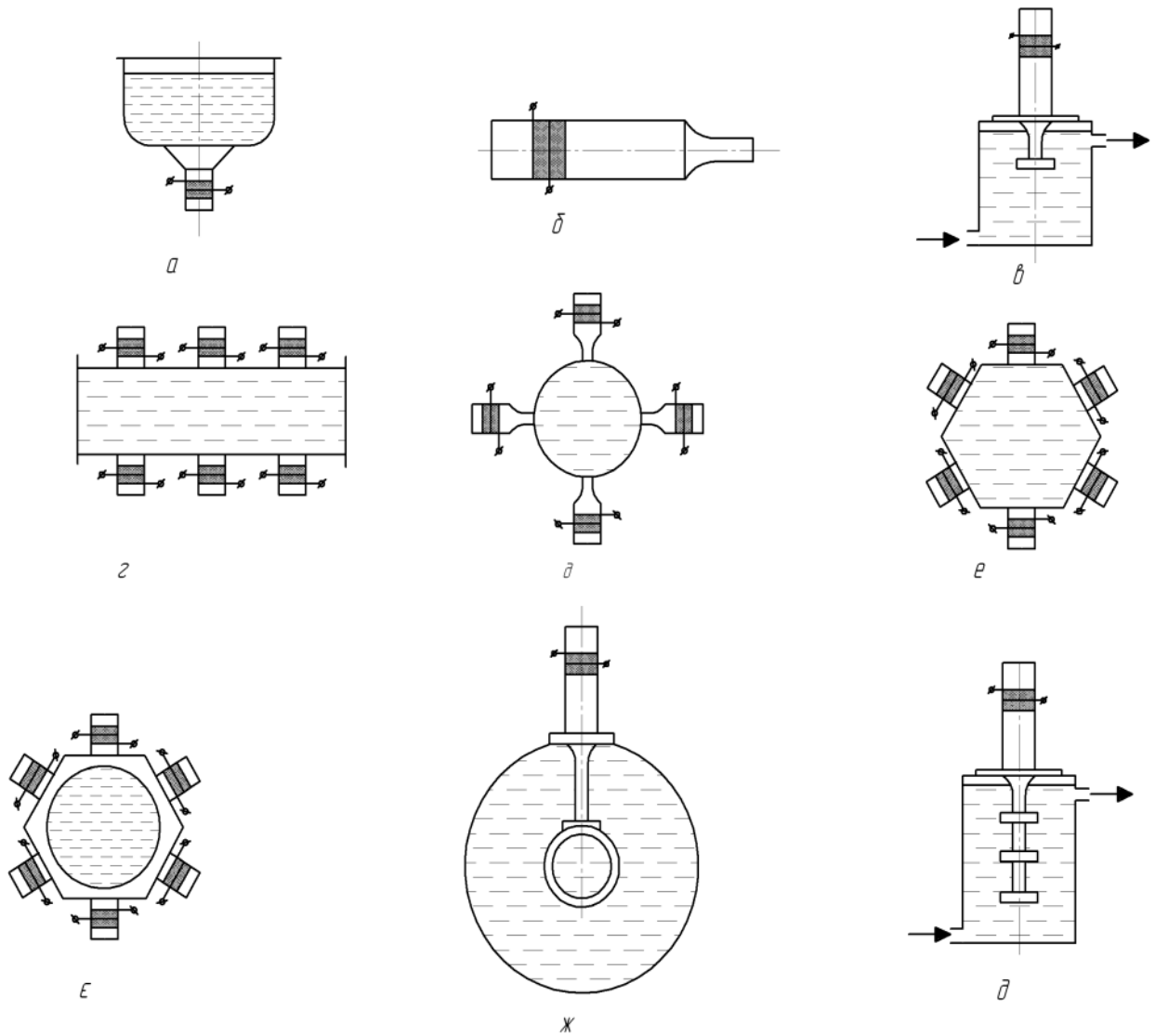


Рисунок 1.18 – Структурна схема «генератор – ультразвукова коливальна система – оброблювальне середовище»

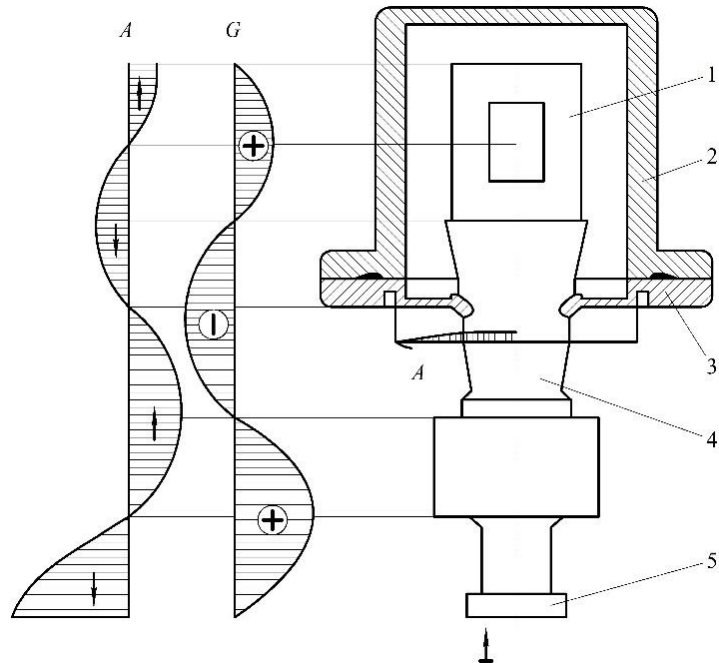
Приклади схемних рішень ультразвукових кавітаційних апаратів відрізняються між собою інтенсивністю обробки середовища та проточністю системи (рис. 1.19).



а – кавітаційна ванна з малоамплітудним приводом-випромінювачем на донній поверхні; б – високоамплітудний привід-випромінювач; в – проточна кавітаційна камера з високоамплітудним приводом-випромінювачем; г, д – проточна циліндрична кавітаційна камера з приводами-випромінювачами на зовнішній твірній поверхні; е – багатогранна фокусуюча кавітаційна камера з плоскими поверхнями; є – багатогранна фокусуюча кавітаційна камера з циліндричною або сферичною внутрішньою поверхнею; ж – проточна циліндрична кавітаційна камера з високоамплітудним приводом і кільцевою поверхнею випромінювання; з – проточна кавітаційна камера з високоамплітудним приводом та розвиненою поверхнею випромінювання

Рисунок 1.19 – Приклади схемних рішень ультразвукових кавітаційних апаратів

Ультразвукова коливальна система (рис. 1.20) складається із перетворювача 1, що розташований в корпусі 2, що з'єднаний із опорою 3. Трансформатор 4 з'єднаний з робочим органом 5 [109].

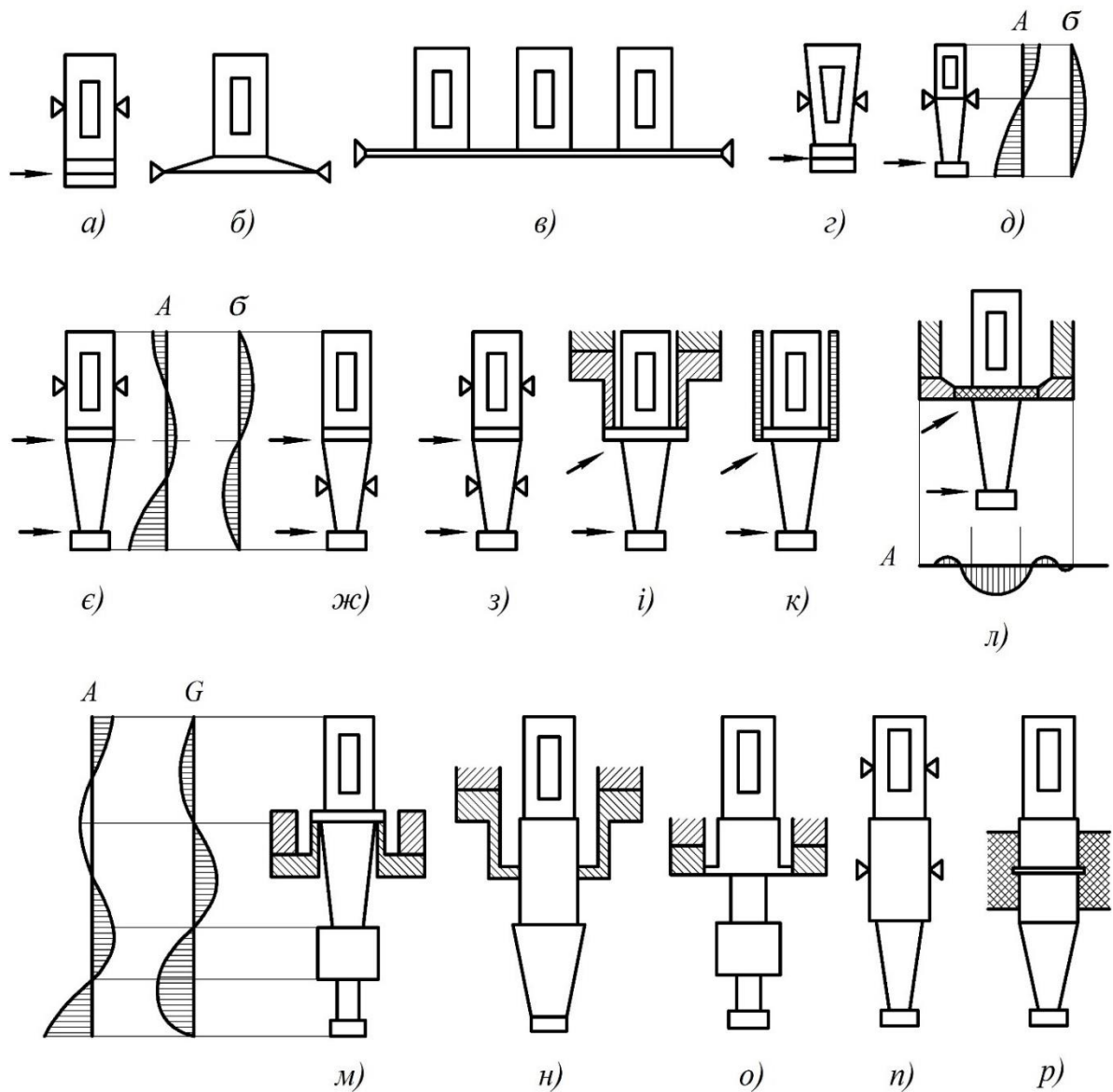


1 – перетворювач; 2 – корпус 3 – опора; 4 – трансформатор; 5 – робочий орган

Рисунок 1.20 – Типова ультразвукова коливальна система

Зліва (див. рис. 1.20) приведені розподіл амплітуди коливань A та внутрішніх напружень G від перетворювача до робочого органу за умови, що не враховано дисипативні сили [149]. В такому випадку у відповідності до положень теорії коливань [184, 185] розподіл амплітуд коливань A та внутрішніх напружень G представляється стоячими хвилями. Максимальні значення амплітуд коливань A відповідають мінімальним значенням внутрішніх напружень G і навпаки.

Звичайно такий розподіл не є точним, проте може слугувати для попереднього аналізу та вибору схеми ультразвукових коливальних систем за схемою розподілу амплітуд коливань, внутрішніх напружень та варіантами кріплення опор (рис. 1.21).



а, б – $\frac{1}{2}$ -хвильові системи; в – $\frac{1}{2}$ -хвильові система із декількома перетворювачами; г – система перетворювачем змінного перерізу; д – $\frac{1}{4}$ -хвильовий перетворювач і $\frac{1}{4}$ -хвильовий концентратор; е, ж – 1-хвильові системи з розподілом амплітуд коливань та внутрішніх напружень вздовж осової лінії; з, і, к, л – 1-хвильові системи із різними варіантами кріплення опор; м – 1 $\frac{1}{2}$ -хвильова система із розподілом амплітуд коливань та внутрішніх напружень вздовж осової лінії; н, о, п, р – 1 $\frac{1}{2}$ -хвильова система із різними варіантами кріплення опор

Рисунок 1.21 – Схеми ультразвукових коливальних систем за схемою розподілу амплітуд коливань та варіантами кріплення опор

Напівхвильові системи (рис. 1.21, а, б) застосовуються для випромінювання ультразвукових хвиль в рідинні середовища, коли не потрібно збільшення амплітуди коливання кавітатора.

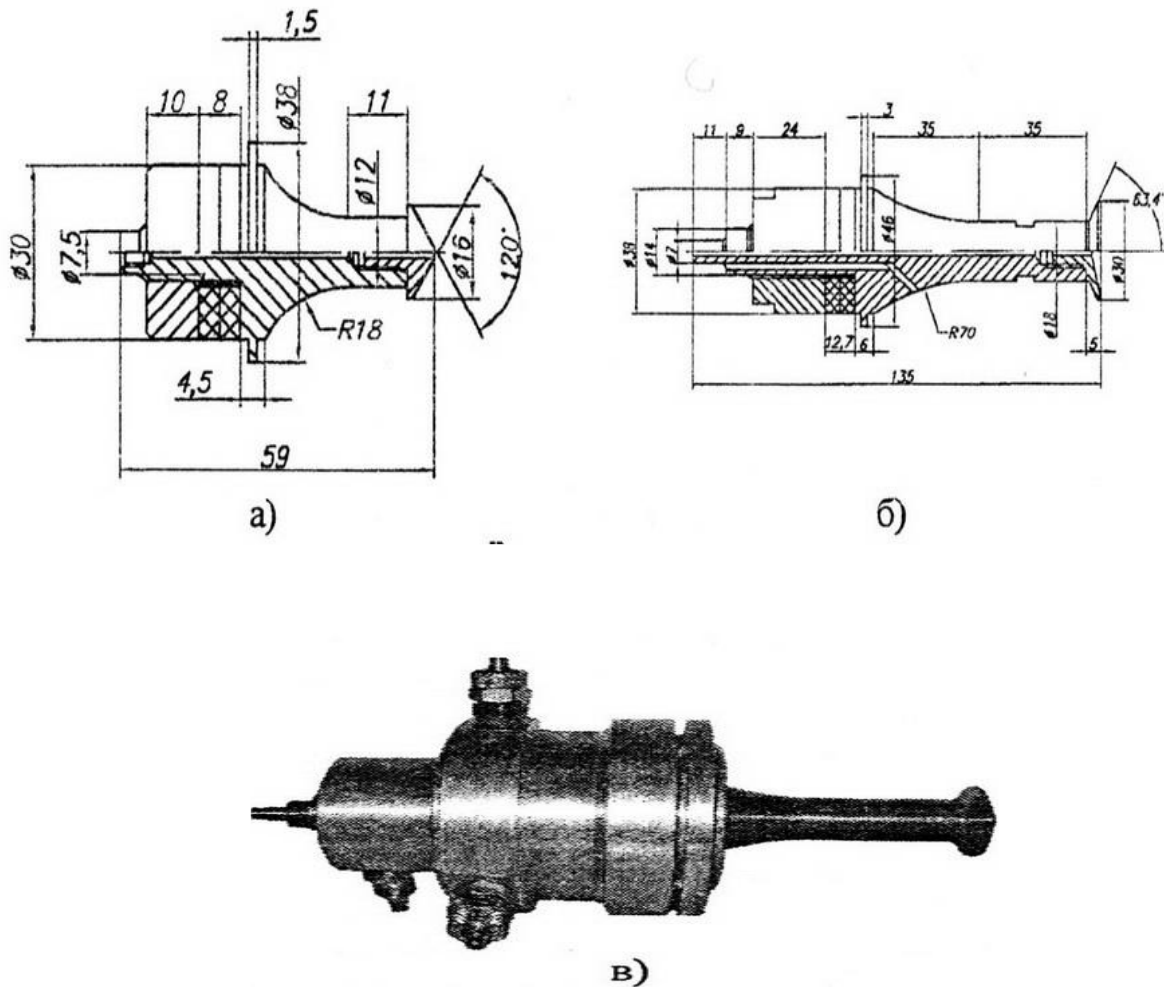
В деяких конструкціях ультразвукових апаратів на пасивному елементі в точках на відстані, яка є кратною довжині згинальної хвилі, встановлюють декілька перетворювачів (рис. 1.21, в). Внаслідок цього збільшується загальна потужність, а коливання є синфазними.

Для збільшення амплітуди коливань застосовують змінний переріз (рис. 1.21, г). Схема (рис. 1.21, д) є $\frac{1}{2}$ -хвильовою, але володіє властивостями концентратора. Якщо за технологічних умов потужність до 0,6 кВт є достатньою, застосовують 1-хвильові системи (рис. 1.21, є – л).

Для потужності від 1 до 4 кВт застосовують $1\frac{1}{2}$ -хвильові акустичні системи. Нижче приведені деякі конструкції акустичних апаратів (рис. 1.22 – 1.37).



Рисунок 1.22 – Ультразвукові коливальні апарати для обробки рідинних середовищ



а), б) – конструкція; в) – зовнішній вигляд

Рисунок 1.23 – Ультразвукові коливальні системи $\frac{1}{2}$ -вхвильові для розпилення рідини

Розроблені та виготовляються проточні ультразвукові диспергатори серії ІЛ 100-6/7 та ІЛ100-6/8 (рис. 1.26) [186].

Реактор установки має коаксіальну конструкцію та оснащений хвильоводом-випромінювачем з розвиненою поверхнею випромінювання. Діапазони робочих температур і тиску, конструкція, матеріал реактора та ультразвукового випромінювача можуть бути різними. Потужність генератора та перетворювача визначаються необхідною витратою реагентів та об'ємом реакційного середовища.



а



б



в



г

а – ультразвуковий апарат “МУЗА” (400 ВА), б – ультразвуковий апарат “Поток-3” (1000 ВА); в – ультразвуковий апарат “Булава”, модель 1000-3 (3000 ВА); г – ультразвуковий апарат “Булава”, модель 1000-6 (6000 ВА)

Рисунок 1.24 – Ультразвукові апарати різної потужності

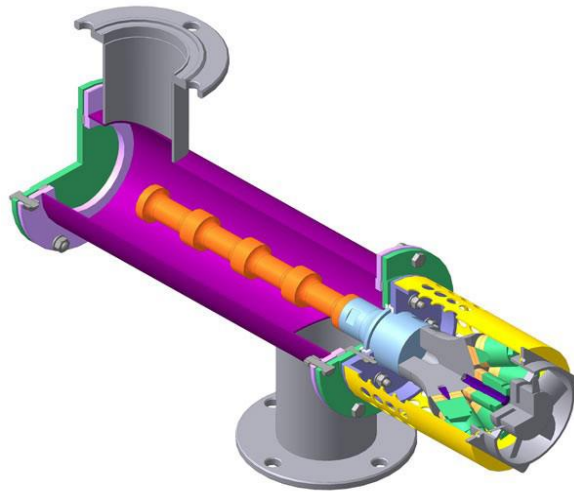
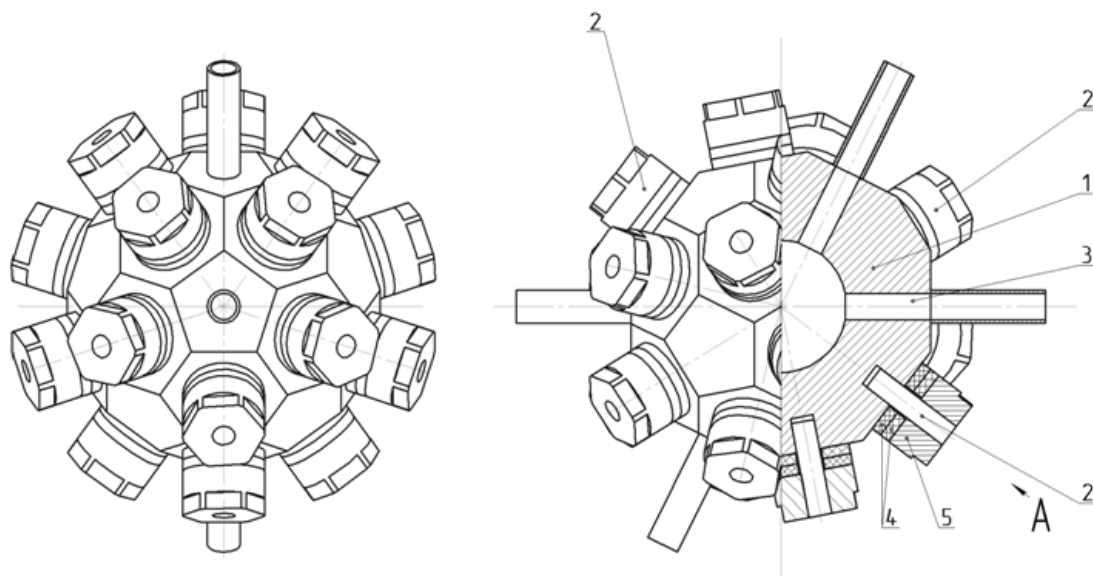


Рисунок 1.25 – Ультразвукова коливальна система в технологічному об'ємі



Рисунок 1.26 – Проточний ультразвуковий диспергатор серії ІЛ 100-6/7

Для обробки середовищ ультразвуком інтенсивністю 500 Вт/см^2 запропоновано конструкцію ультразвукового хімічного реактора для проточної обробки у формі усіченого додекаедра з п'єзокерамічними випромінювачами на шестикутних гранях (рис. 1.27).



1 – технологічний об’єм; 2 – ультразвукові перетворювачі; 3 – канал для подачі компонентів та відведення продуктів реакції; 4 – п’єзоелектричні елементи; 5 – накладки

Рис. 1.27 – Ультразвуковий хімічний реактор надвисокої інтенсивності

Значний інтерес становлять кавітаційні апарати, виконані у вигляді циліндричних камер. У середині протікає технологічне середовище та відбувається його ультразвукова обробка, а на зовнішній поверхні закріплені та акустично пов’язані з нею ультразвукові перетворювачі. Введення коливань в технологічне середовище здійснюється через стінки технологічного об’єму (рис. 1.28).

Такі апарати є складними резонансними коливальними системами, в яких водночас присутні радіально-згинальні, поздовжньо-згинальні та поздовжні коливання оболонки та п’єзоелектричних перетворювачів. Використання запропонованої схеми дозволяє вводити в об’єм коливання високої інтенсивності за рахунок використання більшої кількості ультразвукових перетворювачів, які можуть бути розміщені по периметру технологічного об’єму та вздовж його осі, а також забезпечує можливість тривалого знаходження середовища в зоні ультразвукової кавітації.

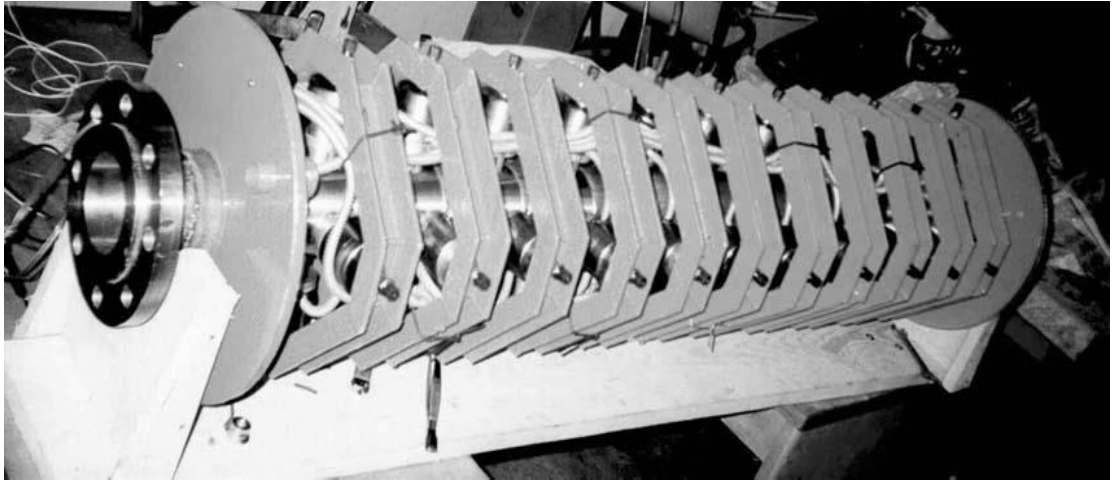


Рисунок 1.28 – Ультразвукова проточна кавітаційна установка потужністю 2,2 кВт та умовним проходом 100 мм

Німецька фірма «Hielscher» [186] розробила ряд ультразвукових апаратів для обробки гетерогенних середовищ з рідкою фазою (рис. 1.29).



а)



б)

Рисунок 1.29 – Ультразвукові апарати серії UIP1000hd (а) і UIP2000 (б)

Ультразвукові коливальні системи (УЗКС) таких апаратів побудовані по багатохвильовій схемі і мають фланцеві з'єднання для приєднання до

проточного об'єму. Матеріал УЗКС, що контактує з оброблюваною середовищем – титановий сплав. Діаметр поверхні, що випромінює при споживаній потужності в 1000 Вт не перевищує 30 мм, а при більшій потужності використовується випромінювання з перехідних ділянок бічних циліндричних поверхонь.

Апарати можуть бути застосовані для ефективного проведення процесів емульгування, диспергування, гомогенізації і проведення хімічних реакцій в гетерогенних середовищах з рідкою фазою. Інтенсивність випромінювання таких апаратів не перевищує 10 Вт/см^2 , і, як наслідок, ці апарати не дозволяють обробляти середовища з в'язкістю понад 100 МПа.

Ще одні ультразвукові апарати, що випускаються фірмою «Mastersonic» (Швейцарія) [187], можуть застосовуватися як в лабораторних, так і в промислових умовах. Їх відмінною рисою є використання УЗКС з трубчастим випромінюючим інструментом великої площі, виконаного з титанового сплаву.

Зовнішній вигляд таких УЗКС показаний на рис. 1.30.



а)



б)

Рисунок 1.30 – УЗКС Sonopuch Mono (а) і Sonopuch (Push-Pull) (б)

Ультразвукові апарати на базі таких систем можуть бути застосовані для створення емульсій, дегазації рідин, гомогенізації. Інтенсивності випромінювання таких апаратів менше 5 Вт/см^2 .



Рисунок 1.31 – Ультразвукові технологічні апарати серії «Булава» для кавітаційної переробки високов'язких і неньютонівських рідких середовищ потужністю 3 (а) і 8 (б) кВт

Ультразвукові апарати для обробки гетерогенних середовищ з рідкою фазою (рис. 1.32) [188].

Кожна з установок складається з стійки, ультразвукового генератора, магнітострикційного перетворювача і трьох хвилеводів-випромінювачів (концентраторів) до перетворювача.



а)



б)

Рисунок 1.32 – Ультразвукова установка серії ІЛ100–6/1 (а) та ІЛ100–6/6

Короткі технічні характеристики установки наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики ультразвукових установок для обробки гетерогенних середовищ з рідкою фазою

Показник	ІЛ 100-6/1	ІЛ 100-6/6
Потужність генератора , кВт	0,63	1
Діаметр робочого інструмента, мм	15	30
Робоча частота, кГц	22	22

Ультразвукове обладнання (рис. 1.33) [167] застосовується для очищення, обробки води або стічних вод, диспергування, приготування стійких емульсій.



Рисунок 1.33 – Ультразвукова установка для очищення, обробки води, диспергування, приготування стійких емульсій

Потужність даного генератора не перевищує 0,5 кВт, а площа випромінювання становить 7 см^2 . З урахуванням загального ККД інтенсивність ультразвуку, що вводиться в технологічне середовище сягає 20 Вт/см^2 [187].

Ультразвукові проточні кавітатори з циліндричною кавітаційною камерою (рис. 1.34) [58] за рахунок фокусуючих властивостей поверхні випромінювання дозволяють в разі збудження радіальної моди коливань досягти інтенсивності ультразвуку понад 100 Вт/см^2 , що дозволяє інактивувати за їх допомогою широкий спектр шкідливих для людини мікроорганізмів.

В конструкції трубчасті вібратори збуджуються $\frac{1}{2}$ -хвильовими п'єзоелектричними приводами поздовжніх коливань, які встановлені на зовнішній твірній поверхні.

Практичний інтерес представляють каскадні хвилеводи зі східчастими (рис.1.35, а) і радіальними (1.35, б) переходами між ділянками різної товщини.



а

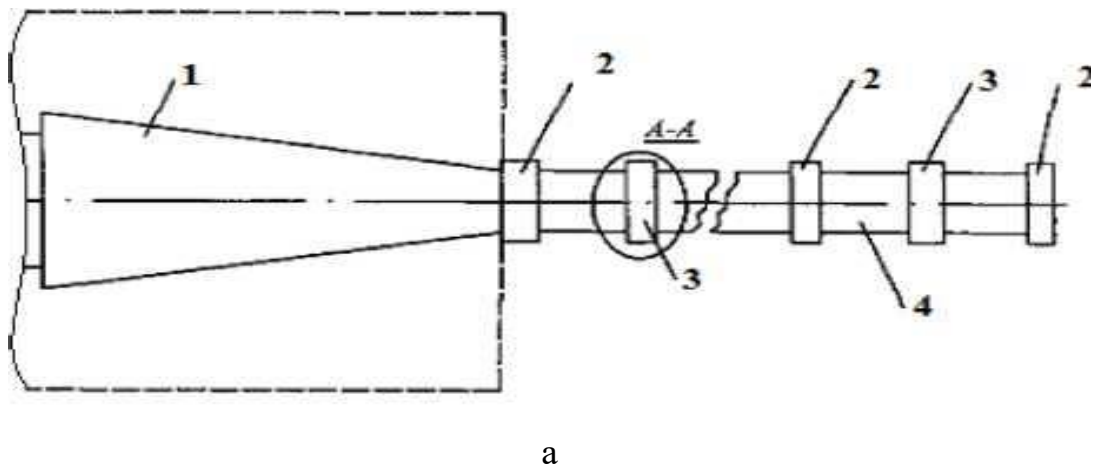


б

а – USS-1200, б – USS-400

Рисунок 1.34 – Ультразвукові проточні кавітатори

Випромінювання УЗ коливань здійснюється з поверхні випромінювача в зонах переходів між циліндричними ділянками різного діаметру.



а – зі східчастими переходами; б – з радіальними переходами

Рисунок 1.35 – Каскадні хвилеводи

Частота коливань є одним із ключових параметрів ультразвукових апаратів при обробці технологічного середовища, особливо при реалізації процесу розпилення рідини [58]. Обумовлено це тим, що збільшення частоти дозволяє зменшити розмір крапель аерозолю.

На рис. 1.36 приведені ультразвукові апарати, які працюють на частотах 22, 30, 44 та 130 кГц.

Ультразвукові апарати із різною інтенсивністю випромінювання енергії приведені на рисунку 1.37.



а



б



в



г

1 – модель УЗТА-0,2/22-ОМ, 22 кГц; 2 – модель УЗТА-0,4/22-ОМ, 30 кГц; 3 – модель УЗА-0,1/44-О, 44 кГц; 4 – модель УЗР-0,1/130-ОМв, 130 кГц

Рисунок 1.36 – Ультразвукові апарати із різною частотою коливань



а



б



в



г

1 – УЗП-0,25/44-О 5 Вт/см²; 2 – УЗТА-0,4/22-ОМ 10 Вт/см²; 3 – УЗТА-0,4/22-ОМ 50 Вт/см²; 4 – УЗТА-0,1/28-О 100 Вт/см²

Рисунок 1.37 – Ультразвукові апарати із різною інтенсивністю коливань

Здійснений аналіз конструкцій ультразвукового обладнання [183, 186–190] дозволив запропонувати [191] класифікацію цих апаратів (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Класифікація ультразвукових кавітаційних апаратів для хіміко-технологічних процесів

№ з/п	Класифікаційна ознака	№ з/п	Тип ультразвукового апарата
1	2	3	4
1	Технологічне призначення	1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 1.10	Диспергування Перемішування Очищення поверхонь Екстрагування Сушіння Дегазація Розчинення Кристалізація Флотація Розділення неоднорідних систем
2	Тип продукції, що обробляється	2.1. 2.2. 2.3. 2.4.	для рідин для газів для твердих тіл для комбінованих середовищ
3	Особливості технологічного режиму обробки	3.1. 3.2. 3.3.	Періодичної дії Безперервної дії Напівбезперервної дії
4	Засіб збудження коливань (тип перетворювача)	4.1. 4.2.	Магнітострикційний П'єзоелектричний

1	2	3	4
5	Тип введення ультразвукових коливачів	5.1. 5.2.	Занурення робочого інструмента в об'єм На стінках камери
6	Тип передачі збудження від перетворювача	6.1. 6.2.	Безпосереднього до інструмента Трансформатор швидкості
7	Тип трансформатора швидкості	7.1. 7.2. 7.3. 7.4. 7.5.	Конічний Ступінчастий Експоненціальний, Катеноїдальний Комбінований
8	Тип коливальної системи	8.1. 8.2. 8.3.	1-хвильова 1/2-хвильова 3/4-хвильова
9	Геометрія камери технологічного об'єму	9.1. 9.2. 9.3.	З плоскими поверхнями Циліндрична Сферична
10	Тип п'єзоелектричного приводу	10.1. 10.2.	Малоамплітудний Високоамплітудний
11	Кількість ультразвукових перетворювачів	11.1. 11.2. 11.3.	Один Декілька Коливальна система

Проведений огляд та аналіз конструктивних схем ультразвукового обладнання засвідчує наступне. Пропонується широка гама різних ультразвукових апаратів для обробки дисперсних середовищ. Для подальшого розвитку та впровадження ультразвукового обладнання потрібно провести дослідження в частині підвищення ефективності на основі врахування умов взаємодії технологічного середовища і апарату.

1.6 Постановка задач досліджень

Основною проблемою підвищення ефективності застосування ультразвуку високої інтенсивності є необхідність вдосконалення та розробка ефективних ультразвукових систем, здатних до широкомасштабної успішної роботи, спеціально адаптованої до кожного окремого процесу. В даній роботі висувається наукова ідея розгляду контактної зони взаємодії системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище» на основі визначення рівноваги силового тиску апарату і напружень, виникаючих в оточенні бульбашки, з розглядом моделі рідини, як системи з розподіленими параметрами. Такий підхід дає можливість розкрити фізичну сутність взаємодії, розробити пропозиції щодо вдосконалення технології обробки технологічних середовищ. Проведений огляд та аналіз сучасного стану технологій та обладнання акустичної обробки технологічних середовищ дозволили сформулювати наступні задачі дисертаційного дослідження:

- здійснити оцінку та виконати аналіз технологій та апаратурного забезпечення віброакустичної обробки дисперсних середовищ;
- розробити методики визначення реологічних властивостей дисперсних середовищ та провести класифікацію ступеню впливу цих властивостей на спільний рух системи «апарат – середовище»;
- виконати аналітичні дослідження розповсюдження хвиль та енергій в оброблювальних середовищах віброакустичного навантаження;
- провести експериментальні дослідження для визначення основних реологічних властивостей технологічних середовищ;
- провести порівняння теоретичних та експериментальних досліджень;
- розробити алгоритми та методики вибору розрахункової схеми технологічного середовища в залежності від його складу та способу обробки;
- сформулювати основні принципи реалізації оптимальних режимів та процесів обробки технологічних середовищ з мінімальними енергетичними витратами та заданою продуктивністю;

- оцінити ефективність та здійснити впровадження результатів досліджень;

- визначити напрямки подальшого розвитку за проблемою дослідження.

Було сформульовано наступні гіпотези, виконання яких дасть можливість вирішити поставлені задачі та досягти бажаного результату:

- функції перетворення електричної енергії в енергію акустичних коливань і випромінювання енергії в робоче середовище повинні бути такими, щоби випромінювач мав забезпечувати найбільш ефективне введення енергії в робоче середовище при узгодженні з силами опору цього середовища, як реакції на силову дію апарату;

- необхідне узгодження реального навантаження технологічного середовища з випромінювачем здійснюється на основі вирішення контактної задачі взаємодії цих підсистем, які підкорені єдиному хвильовому процесу;

- використання математичної моделі, що адекватно відображає кавітаційний процес обробки цього середовища.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ПАРАМЕТРІВ АКУСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

2.1 Методи обробки технологічних середовищ та фізична сутність їх механізмів

Розробка методик дослідження та встановлення раціональних режимів та параметрів акустичних апаратів обумовлена визначенням механізму та фізичної сутності існуючих методів обробки технологічних середовищ. Технологія ультразвукової обробки технологічних середовищ знаходить широке застосування в промисловості, перш за все, стосовно інтенсифікації базових технологічних процесів [59–65, 79, 82, 172].

Основними методами акустичної обробки технологічних середовищ являються: диспергування, емульгування, розчинення, гомогенізація, дегазація, екстрагування [61]. У більшості фізико-хімічних процесів застосування ультразвукової обробки рідких технологічних середовищах обумовлено виникненням режиму розвиненої кавітації і пов'язаних з ним таких явищ: ударні хвилі, мікротечії, акустична турбулентність, сонолюменесценція, кумулятивні мікрострумені і т.п. [158, 161, 163, 166–172].

Диспергування розглядається як процес руйнування монолітних частинок або порушення зв'язку між частинками і здійснюється високочастотними (1–3 МГц) [77, 78, 130] і низькочастотними (22–200 кГц) [179] ультразвуковими коливаннями. Ці два процеси залежать від фізико-хімічних та механічних властивостей вихідних компонентів технологічного середовища. Зазначені властивості, в свою чергу, впливають на величину порогової інтенсивності, швидкість процесу, а також на якісні і кількісні параметри диспергування. Сам процес диспергування за наявності акустичної кавітації обумовлюється механізмом, який складається з двох стадій. На

першій стадії під дією ударних хвиль, що виникають при сплескуванні кавітаційних бульбашок, а на другій під дією кумулятивних мікрострумені рідини, що виникають при сплескуванні несферичних кавітаційних бульбашок. Перевага того або іншого механізму при акустичному диспергуванні обумовлюється початковою формою процесу зародження кавітаційної бульбашки. За умови, що розмір кавітаційної бульбашки більше розміру твердої частинки, бульбашка захоплюється з утворенням ударної хвилі. Якщо розмір частинки перевищує розмір бульбашки, вона втрачає сферичну форму і при сплескуванні утворює кумулятивний мікрострумін, спрямований в бік поверхні частини або іншої бульбашки, що знаходиться поруч [73]. Виходячи із цих припущень, методика оптимізації процесу диспергування має базуватися на наступній основі: параметри ультразвукового апарату забезпечують такий процес, за яким стадія максимального розвитку кавітації прискорює швидкість сплескування кавітаційних бульбашок. Очевидно, методика проведення досліджень має коректно враховувати ці припущення і на цій основі виявляти ступінь достовірності результатів та визначати раціональні параметри.

В процесах диспергування твердих частинок теж мають місце дві стадії. На першій стадії під дією інтенсивних мікропотоків, що утворюються при пульсаціях кавітаційних бульбашок, пори, поглиблення і мікротріщини на поверхні частинки заповнюються рідиною. На другій стадії відбувається розколювання частинок під дією ударних хвиль, що виникають в рідині при сплескуванні кавітаційних бульбашок [138].

Застосування ультразвуку [181–183], як методу емульгування та отримання суспензій є перспективним. В роботах [187–191], було показано існування порогової інтенсивності ультразвуку, нижче якої не спостерігається утворення емульсії. З ростом інтенсивності швидкість утворення емульсій і суспензій збільшується. В роботі [61] показана кінетика процесу емульгування олії в воді і представлені залежності для визначення швидкості процесу емульгування і концентрації емульсії.

Ультразвукове емульгування, як процес переходу однієї з взаємно нерозчинних рідин середовища в дисперсний стан в середовище іншої дає можливість отримувати високодисперсні, практично однорідні і хімічно чисті емульсії. Існує два підходи до пояснення механізму протікання ультразвукового емульгування. За одним підходом фізичний механізм процесу емульгування кавітаційної бульбашки здійснюється в одній з рідин поблизу розділу двох фаз в стадії сплескування захоплює і відриває краплі від загальної маси іншої рідини. За іншим підходом утворення емульсії здійснюється розпадом на краплі кумулятивних струменів, що утворилися при несиметричному закритті кавітаційних бульбашок.

Розчинення – це гетерогенна фізико-хімічна взаємодія твердого тіла і рідини, що супроводжується переходом твердої фази в розчин [192]. Із застосуванням ультразвуку, як способу обробки, значно прискорюється розчинення речовин [193, 194]. Шляхом розчинення можуть бути отримані різні водні, спиртові, масляні розчини кристалічних речовин, розчини сухих і густих екстрактів, сиропів, пігментів, добрив [109, 194–196].

Процес гомогенізації, як технологічний процес, здійснюється над двофазною чи багатфазною системою, внаслідок чого зменшується ступінь неоднорідності розподілу речовин і фаз по всьому об'єму. Гомогенізація застосовується, як процес обробки, в основному в хімічній промисловості для високомолекулярних сполук, так і для макромолекулярних з'єднань [197, 199]. Гомогенізація певним чином є відмінним від процесу диспергування, оскільки виключається процес подрібнення. Разом з тим, є подібність цих процесів між собою, коли мова іде про оброблення ультразвуковими хвилями молока. Ефективність гомогенізації підтверджена при дослідженні впливу ультразвукових хвиль на водні розчини полівінілового спирту.

Дегазація, як процес, передбачає виділення газів з різних розчинів. За фізичним явищем є дифузією розчиненого газу в кавітаційну бульбашку, яка, володіючи плавучістю, швидко піднімається до поверхні і покидає рідину [200]. Ультразвукові коливання забезпечують більш швидке і глибоке

порівняно з іншими методами зниження концентрації розчиненого в рідині газу [196, 201].

Ультразвукова дегазація рідких середовищ застосовується для виділення газів з розчинів рослинного та трансформаторного масла, віскози, соусів і інших середовищ. Використовується цей метод і для очищення сплавів від домішок, в мастильних матеріалах для видалення розчиненого в них кисню. Важливим параметром, що визначає ефективність застосування цього методу є врахування в'язкості середовища [28]. Тому в методиці досліджень передбачається приділити увагу класифікаційним ознакам технологічних середовищ за в'язкістю.

Екстрагування, як процес вилучення з твердої або рідкої складної речовини одного або кількох її компонентів, найбільш є ефективним із застосуванням ультразвуку. Проведеними нами раніше дослідженнями [6–12] доведена висока ефективність екстрагування пектину. При цьому має місце не тільки значне прискорення процесу вилучення необхідних речовин, але і збільшення, порівняно з іншими методами екстрагування, виходу основного продукту.

Для ефективного впливу на хіміко-технологічні процеси використовуються потужні акустичні генератори, що випромінюють хвилі високої інтенсивності, які супроводжуються нелінійними акустичними ефектами [175, 202–204]. Саме наявність цих нелінійних ефектів - акустичних течій, пондеромоторних сил, поверхневих ефектів, кавітації, радіаційного тиску та ін. – забезпечується можливість ефективного впливу на технологічні процеси в гомогенних рідких середовищах [175, 176, 204–211].

Здійсненням визначенням механізму та фізичної сутності існуючих методів обробки технологічних середовищ, виявленням їхніх особливостей, відмінностей та можливої подібної поведінки в реалізації стадій кавітаційного процесу засвідчують наступне:

- виникаючі фізичні ефекти при кавітації прямо пропорційні інтенсивності сплескування бульбашок, тобто сумарної енергії ударних хвиль, створюваної на етапі завершення стадії протікання технологічного процесу;
- фізико-хімічні та механічні властивості вихідних компонентів технологічного середовища відіграють визначну роль при реалізації того чи іншого методу акустичної обробки;
- процес визначається режимами ультразвукового впливу (частота і амплітуда звукового тиску) і фізичними властивостями оброблюваного середовища, такими як щільність, поверхневий натяг і реологічні властивості (пружність, в'язкість).

2.2 Методологічні аспекти визначення основних класифікаційних ознак оброблювальних середовищ

Знання достовірності фізики процесів, що протікають при обробці технологічних середовищ, потребують у якості вихідної інформації наявність чіткого уявлення про ті параметри і характеристики середовищ, що відображають їх склад та реологічні властивості, а також необхідну зміну цих характеристик [47–53].

Такі параметри та характеристики має відображати класифікація матеріалу чи середовища. Питання класифікації за своїм значенням завжди стоїть на одному з перших місць, оскільки воно визначає характеристики об'єкта та предмета дослідження, взаємозв'язок окремих розділів та зв'язок з дослідженнями в цих розділах. Слід зауважити, що класифікацію часто розуміють як операцію розподілу за різними групами [116]. Насправді ж якраз навпаки, класифікація є операцією об'єднання, а саме множина характеристик, що підлягають класифікації, об'єднується у певні групи за характерними ознаками.

Класифікація проводиться тільки тоді, коли є множина об'єктів і необхідно серед них встановити певний порядок, об'єднати їх у певні групи за

певними домінуючими ознаками. Якщо класифікація будується за основними властивостями середовища, які є визначальними для процесів їх обробки і відображає їх зміну в процесі обробки, то відкривається можливість більш точного прийняття рішень при визначенні параметрів та режимів обробки. Так загальноприйнята класифікація середовищ, які підлягають віброакустичній обробки, відсутня. Причин декілька. Перш за все відсутня загальноприйнята картина зміни реологічних властивостей середовищ при протіканні процесу кавітаційної обробки. Не встановлені точні значення акустичних параметрів процесу та технологічні аспекти їхньої зміни. Немало важливим фактом є протиріччя в дослідженнях про необхідність врахування в'язких властивостей середовищ, та оцінки ступеня впливу в'язкості на вибір параметрів.

Синтезуючи роботи [116, 136], що мають відношення до класифікації технологічних середовищ, можна виділити такі їх ознаки: режим навантаження на випромінювач, фізичні характеристики та умови впливу на випромінювач. Так за режимом навантаження на випромінювач середовища поділяються на: акустично необмежені середовища з постійними фізичними параметрами; середовища з постійними габаритами, що мають постійні фізичні параметри; акустично необмежені середовища зі змінними фізичними параметрами; середовища зі змінними габаритами або такі, що мають змінні фізичні параметри.

За фізичними характеристиками: рідкі середовища; дисперсні середовища; тверді середовища. За умовами впливу на випромінювач: нейтральні середовища; хімічно агресивні; температурно-агресивні.

Акустично необмежені середовища з постійними фізичними параметрами (значення яких залишаються незмінними в процесі ультразвукової обробки) характеризуються тим, що величина вхідного опору середовища, тобто навантаження, прикладене до випромінювача, залишається постійною величиною і не залежить від габаритів оброблювального середовища. Для забезпечення цієї вимоги, розміри і величина поглинання акустичної енергії в одиниці об'єму оброблювального середовища повинні

бути достатніми для знехтування реакцією відбитих хвиль на випромінювач. Для акустично необмеженого рідкого середовища опір випромінювання, навантаженого цим середовищем, є вхідним опором середовища, визначається його параметрами, частотою, типом і розмірами випромінювача. Для акустично обмеженого середовища з постійними фізичними параметрами і з постійними габаритами, величина вхідного опору залежить від габаритів, так як реакція відбитих хвиль на випромінювач, що залежить від їх амплітуди і фази, визначає значення вхідного опору.

Залежно від ступеня поглинання хвиль при відбитті від границь об'єму, займаного середовищем, і в самому середовищі, а також від числа відображень і їх фазових зрушень реакція на випромінювач може бути різною. Так може виявитися, що, внаслідок відносно малої (в порівнянні з поверхнею стінок) площі випромінювача і значного поглинання всіх відбитих хвиль, реакція їх буде настільки мала, що вхідний опір практично може бути визначено як для акустично необмеженого середовища.

Ефективність введення коливань в акустично необмежені і обмежені середовища може бути забезпечена шляхом узгодження величини вхідного опору з джерелом коливань (перетворювачем) і з хвилеводною системою. Для середовищ зі змінними параметрами можуть змінюватися коефіцієнт згасання хвиль і швидкість розповсюдження хвиль, що характерно для режимів розвиненої кавітації.

Приведена інформація щодо визначення класифікаційних ознак є суто формалізованою. Вона відображає тільки ту частину, яка пов'язана із оцінкою розповсюдження хвиль в середовищі та взаємодією цих хвиль з випромінювачем. Необхідне уточнення в частині конкретизації картини зміни реологічних властивостей середовищ при протіканні процесу кавітаційної обробки. Необхідною умовою є також встановлення значень акустичних параметрів процесу, ступінь їхньої зміни та впливу цієї зміни на вибір параметрів. Важливим аспектом для класифікації є також визначення умов, для яких виникає необхідність врахування в'язких властивостей середовищ, та

оцінки ступеня впливу в'язкості на вибір параметрів. Ці дослідження передбачені і їх результати приведені у відповідних розділах роботи, що надає можливість запропонувати класифікацію технологічних середовищ.

2.3 Методика визначення функціональних залежностей між акустичними параметрами кавітаційного апарату та реологічними властивостями оброблювальних технологічних середовищ

Домінуючий вплив на послідовність протікання кавітаційного процесу здійснюють наступні акустичні параметри та властивості середовища [51, 53, 55] :

$$F = f\{A, A_i, f, v, W, P, L, t, l, p, \sigma, c, E, \rho, \mu\}, \quad (2.1)$$

де F - функціонал (інтегральний критерій оцінки процесу); A - амплітуда коливань контактної зони «акустичний апарат – середовище»; A_i – потокова амплітуда коливань середовища на відстані x_i від границі контактної зони «акустичний апарат – середовище»; f – частота коливань акустичного апарату; v – швидкість коливань контактної зони «акустичний апарат – середовище»; W – енергія, P – потужність; L – інтенсивність; t – час; l – характерний розмір середовища у напрямку розповсюдження в ньому акустичної хвилі; p – тиск на середовище; σ – напруження в середовищі; c – швидкість розповсюдження акустичної хвилі в середовищі; E – модуль пружності середовища; ρ – густина середовища; μ – коефіцієнт в'язкості середовища.

Інтегральними параметрами функції (2.1) являються енергія, інтенсивність та потужність [45, 50, 54]. Варто зазначити, що ультразвукова енергія від випромінюючої поверхні ультразвукового апарату до середовища перетерплює кілька стадій перетворення, здійснюючи звуковий тиск шару рідини:

– звуковий тиск обумовлює утворення кавітаційних порожнин (бульбашок) у рідині, і здійснюється запас енергії в кавітаційних бульбашках, викликаючи його розширення;

- при сплескуванні кавітаційної бульбашки, енергія накопичена в бульбашці, перетвориться в енергію ударної хвилі;
- енергія ударної хвилі витрачається на утворення на поверхні рідини капілярних хвиль;
- енергія капілярної хвилі витрачається на збільшення вільної поверхні рідини, тобто збільшення амплітуди капілярної хвилі, з гребеня якої при втраті стійкості зривається крапля аерозолі.

Таке множинне перетворення енергії ультразвукових коливань потребує системного підходу при встановленні оптимальних режимів обробки, який полягає у намаганнях дослідників встановити дійсну картину кавітаційного процесу. Одним із підходів є розгляд процесу формування дрібнодисперсного аерозолі на вібруючій, вкритій, тонким шаром рідини, поверхні ультразвукового перетворювача [59, 60]. Процес розглядається на прикладі диспергованої рідини кінцевої товщини h , у якій формуються кавітаційні бульбашки (рис. 2.1).

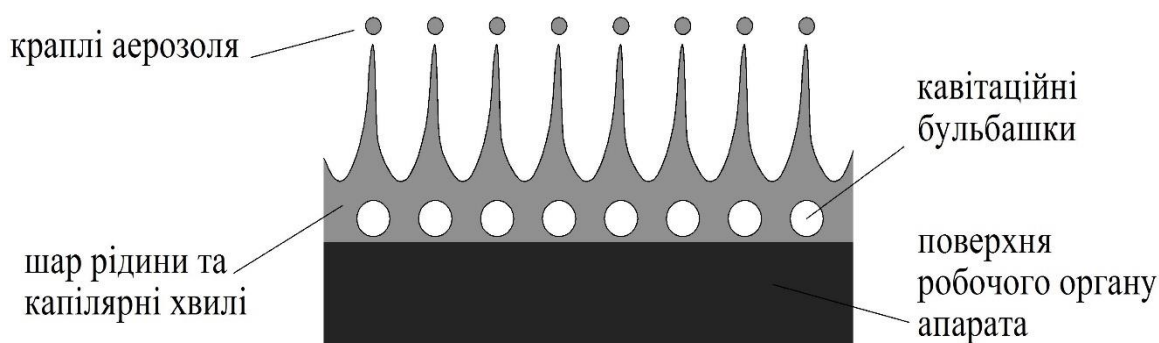


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення механізму утворень капель рідини

На основі, наведених вище, стадій перетворення ультразвукової енергії можна виділити наступні основні етапи розгляду процесу[50,54]:

- встановлення залежності амплітуди звукового тиску від товщини шару оброблювального середовища рідини з урахуванням в'язкості рідини, при незмінній амплітуді ультразвукових коливань;

- встановлення залежності радіуса кавітаційної бульбашки від амплітуди звукового тиску, а отже, і від товщини шару рідини, визначення максимального значення радіуса бульбашки;
- визначення амплітуди тиску, що виникає при сплескуванні кавітаційної бульбашки максимально можливого радіуса;
- визначення амплітуди капілярних хвиль, що виникають на вібруючій поверхні;
- порівняння отриманої амплітуди із граничною, при якій починається інтенсивна обробка середовища з утворенням дрібнодисперсного аерозолю.

Звідси впливає система функціональних залежностей між наступними величинами:

$$\left. \begin{aligned} p &= f(A, \omega, h, \rho); \\ R_{\text{кав}} &= f(p, \eta, \sigma); \\ p_m &= f(R_{\text{кав}}, h); \\ A &= f(p_m, \eta, \sigma), \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

де p – тиск; p_m – максимальний тиск; A – амплітуда коливань; ω – частота коливань; h – товщина шару; ρ – щільність; η – коефіцієнт вязкості; $R_{\text{кав}}$ – радіус кавітаційної бульбашки; σ – напруження.

Розглянемо загальну методологію визначення тисків, як домінуючих параметрів кавітаційного процесу, виходячи із наступної умови. В будь-який довільний момент часу сума всіх діючих тисків на будь-який елементарний об'єм рідини, утримуючий кавітаційну бульбашку, дорівнює нулю, тобто бульбашка перебуває в стані динамічної рівноваги в кожному розглянутий момент часу. А такими тисками є: рівнодіючий, p_p , динамічний, p_d , парогазовий та зовнішній, $p_{\text{зовн.}}$. Тоді стан динамічної рівноваги кавітаційної бульбашки можна записати в наступному вигляді:

$$p_p + p_d - p_{\text{пг}} + p_{\text{зовн.}} = 0. \quad (2.2)$$

Існуючі залежності для вказаних тисків визначаються за наступними залежностями.

Рівнодіючий тиск [77]:

$$p_P = \rho \frac{d^2 R}{dt^2}. \quad (2.3)$$

Динамічний тиск [84]:

$$p_d = \frac{3}{2} \rho \left(\frac{dR}{dt} \right)^2. \quad (2.4)$$

Тиск парогазової суміші в бульбашці [74,181]:

$$p_{пг} = p_{г} + p_{п} - p_{пн}, \quad (2.5)$$

де тиск газу, $p_{г}$, при зміні розміру бульбашки під дією зовнішніх сил [142]:

$$p_{г} = \left(p_0 - p_{п} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma}. \quad (2.6)$$

Тиск, що створюється силами поверхневого натягу [84]:

$$p_{пн} = 2\sigma/R. \quad (2.7)$$

Зовнішній тиск, що створюється джерелом коливань:

$$p_{зовн.}(t) = -p \sin \omega t + p_0. \quad (2.8)$$

Знак «мінус» у виразі означає, що в момент часу $t=0$ починається півперіод розрідження. Складність зміни тиску засвідчує графік(рис.2. 2), наведений в роботі [84]. Як слідує із рис. 2.2, на відрізку зміни швидкості в межах 0,10...0,30 м/с, тиск має ділянки збільшення та зменшення за характером та числовими значеннями. В цитованій роботі [84] не зазначаються причини такої зміни.

Визначення ступені впливу різних видів тиску на процес кавітації розглянуто дещо пізніше, оскільки необхідно знати числові значення параметрів, що входять в залежності (2.3) – (2.8). Визначення зміни реологічних властивостей технологічного середовища, що має місце в процесі кавітаційної обробки, якими є в'язкість, пластичність і пружність [23,26,27,47], обумовлена вибором моделі [55], яка враховує ці зміни.

Важливим аспектом отримання достовірних результатів є обґрунтування методів її представлення в математичному описі процесу кавітації під дією якої утворюються бульбашки [17–19], їх осциляція, розвиток з наступним сплескуванням.

Очевидним є той факт, що цей процес супроводжується складним масо- і теплообміном [82, 116, 123] у сформованій кавітаційній області. Так,

наприклад в роботі [99] показано, що середня щільність енергії та питома потужність, які відповідають моменту сплескування кавітаційної бульбашки у воді під дією звукових коливань відповідно в 10^3 та в 10 разів перевищують параметри хвилі збудження.

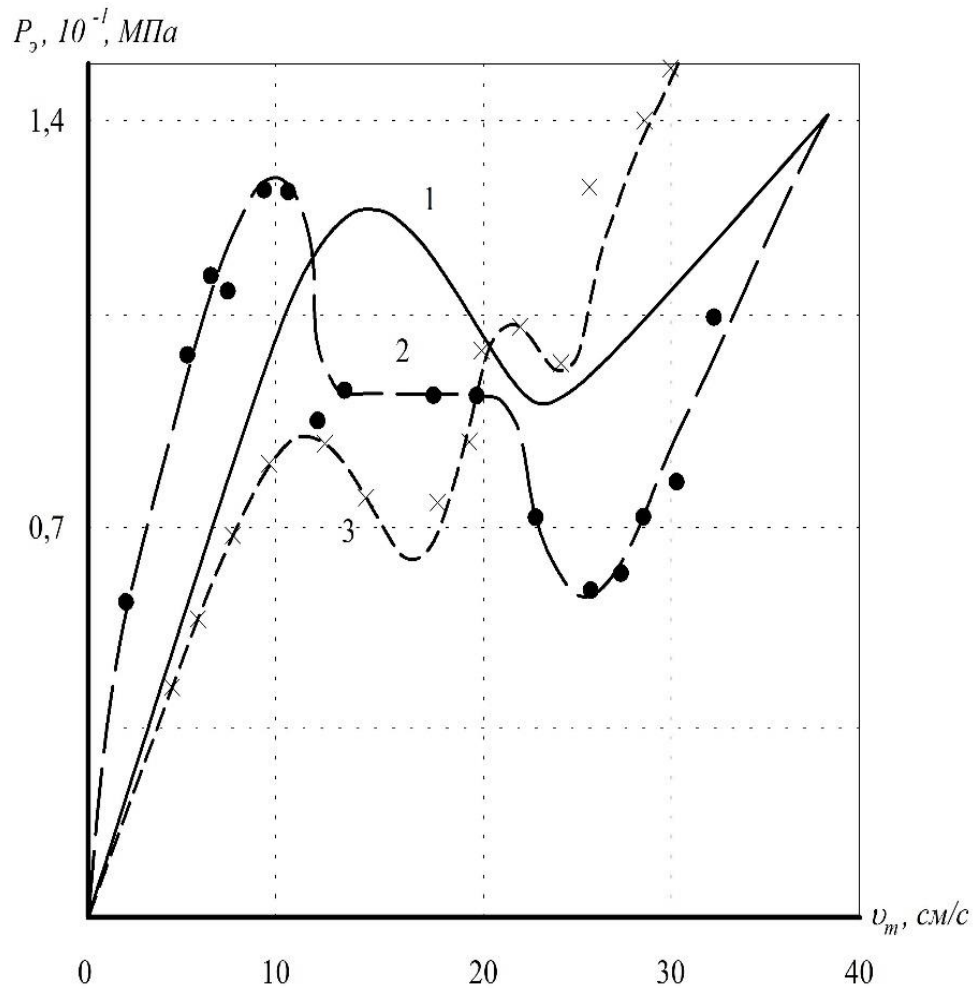


Рисунок 2.2 – Залежність зміни тиску від швидкості

Тому варто зупинитися на оцінці існуючих підходів до передачі енергії від акустичного апарату до технологічного середовища [16, 41, 45, 49]. Якщо розглядати лінійний режим, то він потребує забезпечення умови, за якою бічні розміри поверхні акустичного апарату у напрямку передачі енергії по координаті x набагато перевищують довжину звукової хвилі (λ). За другої умови має забезпечуватися збереження суцільності руху в зоні контакту

апарату і середовища. Тоді реалізується синусоїдальний режим і утворення звукової хвилі в області середовища: $x > 0$ здійснюється за законом:

$$x(t) = A \cos(2\pi f t + \varphi_0), \quad (2.9)$$

де f – частота коливань, A – амплітуда коливань, φ_0 – початкова фаза, яка визначає початкові ($t=0$) умови руху кавітатора.

Наприклад, якщо $\varphi_0=0$, то переміщення x і швидкість V акустичного апарату: $x = A \sin$ і, $V=dx/dt=0$ відповідно, коли $t=0$. У лінійному режимі вібраційний тиск хвилі є функцією x і t , і, як один із головних параметрів енергії, визначається за залежністю:

$$P(x, t) = P_0(x) \cos(kx - \omega t) = p_0 e^{-\alpha x} \cos(kx - \omega t), \quad (2.10)$$

де $P_0(x)$ – амплітуда акустичного тиску, яка є функцією координати x і дорівнює $p_0 e^{-\alpha x}$, де $P_0 = P_0(0)$, тиск в зоні контакту при $x = 0$.

Інші параметри включають кутову частоту $\omega = 2\pi f$, хвильове число $k = 2\pi/\lambda$ і коефіцієнт розсіювання енергії α , який є функцією частоти в мегагерцовому діапазоні. Коефіцієнт α описує передачу енергії від звукової хвилі до середовища переважно через процеси поглинання та розсіювання. Поглинання перетворює акустичну енергію в тепло, переважно через в'язкий опір. У середині водних, як, і в інших технологічних середовищах, існують неоднорідності.

Розсіювання – це процес, за допомогою якого неоднорідності спрямовують деяку звукову енергію за межі первісного шляху поширення хвилі. Якщо щільність неоднорідності висока, може мати місце багатократне розсіювання. Іншими словами, в таких випадках звукова енергія може розсіюватися між кількома неоднорідностями кілька разів, перш ніж вона зменшується поглинанням.

Для загального розгляду залежностей у рівнянні (2.10) можна прийняти, що коефіцієнт α для воді є незначним, а показник $e^{-\alpha x}$ може вважатися рівним одиниці. Частота та довжина хвилі пов'язані співвідношенням $f\lambda = c$, де c – фазова швидкість. У воді фазова швидкість при 20°C приблизно дорівнює 1500 м/с [19]. Якщо $x = x_0$, то вираз для тиску $p(x, t)$ для контактної зони

«кавітатор – середовище» в рівнянні (2.10) буде мати вид:

$$p(x_0, t) = P_0(x) \cos(kx_0 - \omega t) = p_0 e^{-\alpha x} \cos(kx_0 - \omega t). \quad (2.11)$$

При цьому акустичний тиск у будь-якій точці поверхні апарату на середовище за умовою $x=x_0$, фаза якої дорівнює $kx_0 - \omega t$, змінюється синусоїдально в часі. Коли плоска звукова хвиля вводиться в рідину, можуть виникати кілька фізичних явищ. Оскільки акустичний тиск $p(x, t)$ змінюється з x , градієнт тиску, який супроводжує звукову хвилю, надає силу в напрямку x на одиницю об'єму рідини або в будь-якому місці середовища, де поширюється ультразвукова хвиля, тобто локальне значення тиску представляється як $-\partial p(x, t)/\partial x$.

За другим законом Ньютона:

$$\rho_0 \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial p(x, t)}{\partial x}, \quad (2.12)$$

де ρ_0 та $v(x, t)$ – щільність та швидкість частинки середовища, відповідно.

Підставляючи рівняння (2.10) в рівняння (2.11) і припускаючи, що $\alpha x \ll 1$ отримують залежність для визначення швидкості:

$$v(x, t) \approx v_0 e^{-\alpha x} \cos(kx - \omega t) \approx \frac{p_0}{\rho_0} c e^{-\alpha x} \cos(kx - \omega t). \quad (2.13)$$

Рівняння (2.13) вказує на те, що для хвилеподібної хвилі, що поширюється в однорідному середовищі з малим згасанням, акустичний тиск і швидкість частинки знаходяться в фазі, а відношення між ними є постійним:

$$\frac{p(x, t)}{v(x, t)} = \rho_0 c = Z, \quad (2.14)$$

де Z називається «акустичним питомим опором» або «акустичним імпедансом» [195, 280].

Більш детально його застосування та функціональна залежність від параметрів кавітаційного процесу буде розглянута нижче. Одновимірною падаючою хвилею, що розповсюджується вздовж напрямку x , може бути представлена $p(x, t) = p_0 \cos(kx - \omega t)$, припускаючи, що загасання $\alpha = 0$. Тепер, коли має місце ідеальний відбивач, перпендикулярний до напрямку поширення хвилі, дозволяючи падаючій хвилі накладатися на іншу хвилю, що

біжить в напрямку «-x» (представленому в рівнянні, замінивши аргумент « $kx - \omega t$ » на « $kx + \omega t$ »), отримаємо постійну хвилю, заданої формулою:

$$p(x, t) = 2p_0 \cos kx \cos \omega t.$$

Формула демонструє характер зміни тиску за умови відсутності дисипативного члена ($\alpha = 0$). Складні максимальні значення тиску відбуваються при $\cos kx = \pm 1$, і т.д. за значеннях $x = 0, \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2$ і т.д. Аналогічно, вузли мінімальних значень тиску знаходяться тоді, коли $\cos kx = 0$, тобто за значення $x = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4$ і т. д. Відстань між послідовними вузлами тиску становить $\lambda/2$. Цей аналіз є важливим для визначення зон раціонального вибору лінійного режиму.

Однак, неврахування коефіцієнта α є справедливим виключно для резонансного режиму. Акустична енергія передається в технологічне середовище поряд з поширенням ультразвуку. Через хвильовий рух на будь-якій даній відстані x від джерела звуку (акустичного апарату) в середовищі поширюється акустична енергія. Для плоскої неспіткованої рухомої хвилі тиск (2.10), усереднена за часом швидкість (2.13), при якій робота виконується через будь-який подібний хвильовий рух, що приходить на одиницю площі, є акустичною інтенсивністю (I) [53, 58], яка є середнім значенням часу ключових параметрів $p(x, t)$ і $v(x, t)$ протягом періоду $T = 1/f$:

$$I(x) = \frac{1}{T} \int_0^T p_0 e^{-2\alpha x} \cos(kx - \omega t) v_0 \cos(kx - \omega t) dt = \frac{1}{2} p_0 v_0 e^{-2\alpha x} =$$

$$\frac{1}{2} p(x) v(x) = \frac{\frac{1}{2} p_0^2 e^{-2\alpha x}}{\rho c} = I_0 e^{-2\alpha x}, \quad (2.15)$$

де $I_0 = \frac{p_0^2}{2\rho c}$ – інтенсивність при $x = 0$.

Інтенсивність може бути представлена через інші параметри кавітаційного процесу

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho c}{\omega^2} \alpha^2 = \frac{1}{2} \rho c v_m^2. \quad (2.16)$$

За відомим значенням інтенсивності, щільності середовища, частоти коливань, швидкості розповсюдження хвиль, можна отримати числові

значення тиску, амплітуди, швидкості та прискорення коливань контактної зони. :

$$p = \sqrt{2\rho c I} \quad ; A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}; \quad v = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}; \quad \alpha = \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}. \quad (2.17)$$

Отже, інтенсивність є тим ключовим критерієм, який визначає рівень енергії.

Для лінійного режиму, як це слідує із формул (2.16) та (2.17), підвищення числових значень інтенсивності, чого потребують середовища із значною в'язкістю (див. п. 1.2), необхідно значно збільшувати амплітуду або частоту акустичного апарату. Разом з тим, це значно збільшує необхідну потужність джерела енергії, що безумовно не завжди ефективно. Дійсно, підвищення витраченої енергії, як слідує із відомого співвідношення $E = W \Delta \tau$, потребує значного збільшення потужності (рис. 2.3) [57, 60].

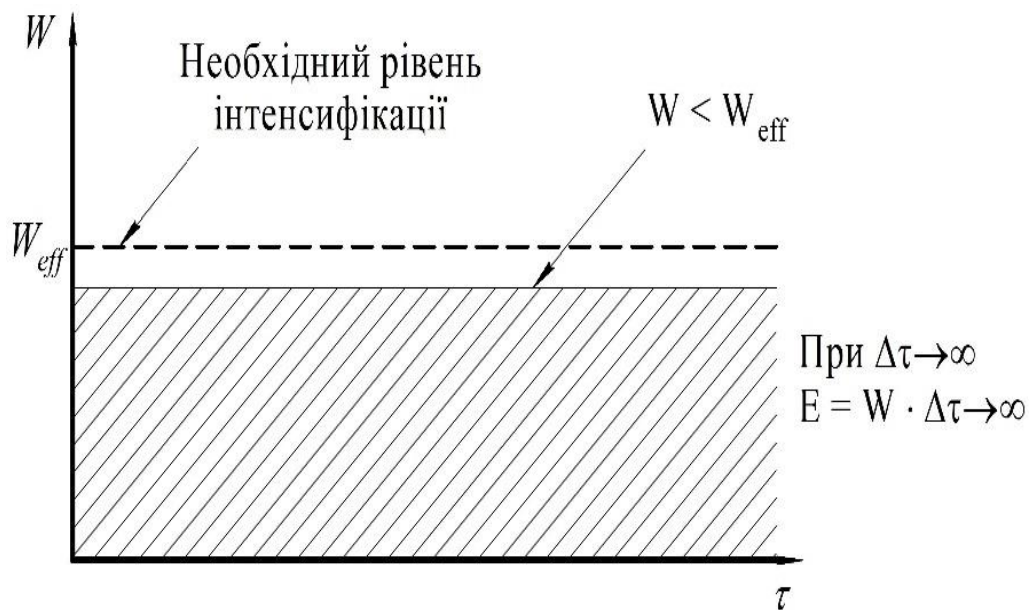


Рисунок 2.3 – Лінійне синусоїдальне введення енергії в технологічне середовище

Відомо інший підхід до інтенсифікації тепломасообмінних і гідромеханічних процесів в дисперсних середовищах [57, 60]. Цей підхід

представляє собою нелінійне, дискретно-імпульсне введення енергії. Сутність його полягає у швидкій зміні зовнішнього тиску (рис. 2.4) [60].

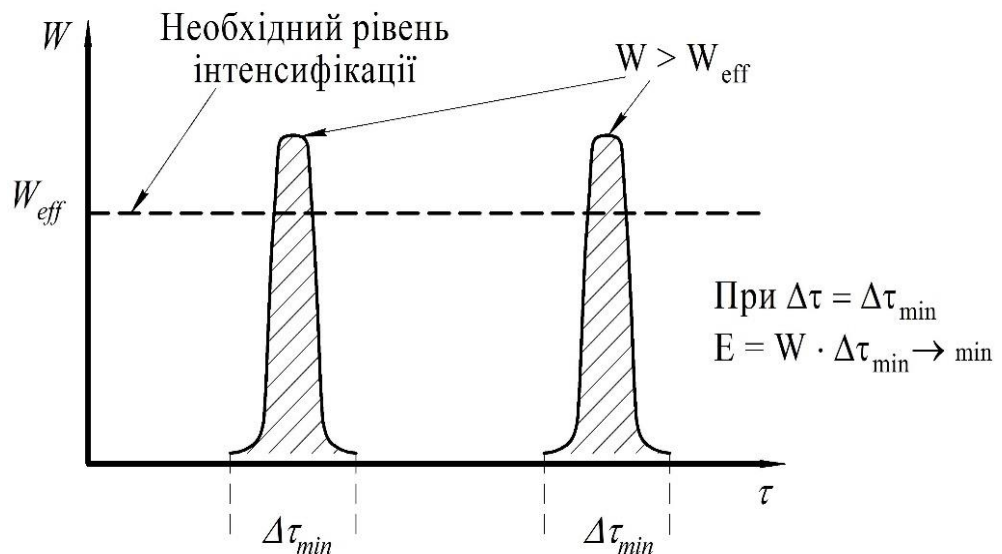


Рисунок 2.4 – Дискретно-імпульсне введення енергії в технологічне середовище

2.4 Методологія та алгоритм дослідження опору технологічного середовища на рух акустичного апарату

Методологія дослідження опору технологічного середовища на рух акустичного апарату базується на наступній гіпотезі: ефективність формування кавітаційної енергії визначається структурою та взаємодією основних елементів ультразвукової технологічної системи (рис. 2.5)

Ефективність введення коливань від акустичного апарату в технологічне середовище залежить від ряду умов, які забезпечують [47, 57]:

- максимально можливий відбір енергії від джерела коливань;
- мінімальне розсіювання енергії в елементах конструкції технологічного апарату;

– найбільше використання введеної в оброблюване середовище акустичної енергії для забезпечення протікання даного технологічного процесу;

– максимальну стійкість параметрів акустичного апарату в наперед заданих технологією їхніх значень та режимів роботи акустичного апарату.

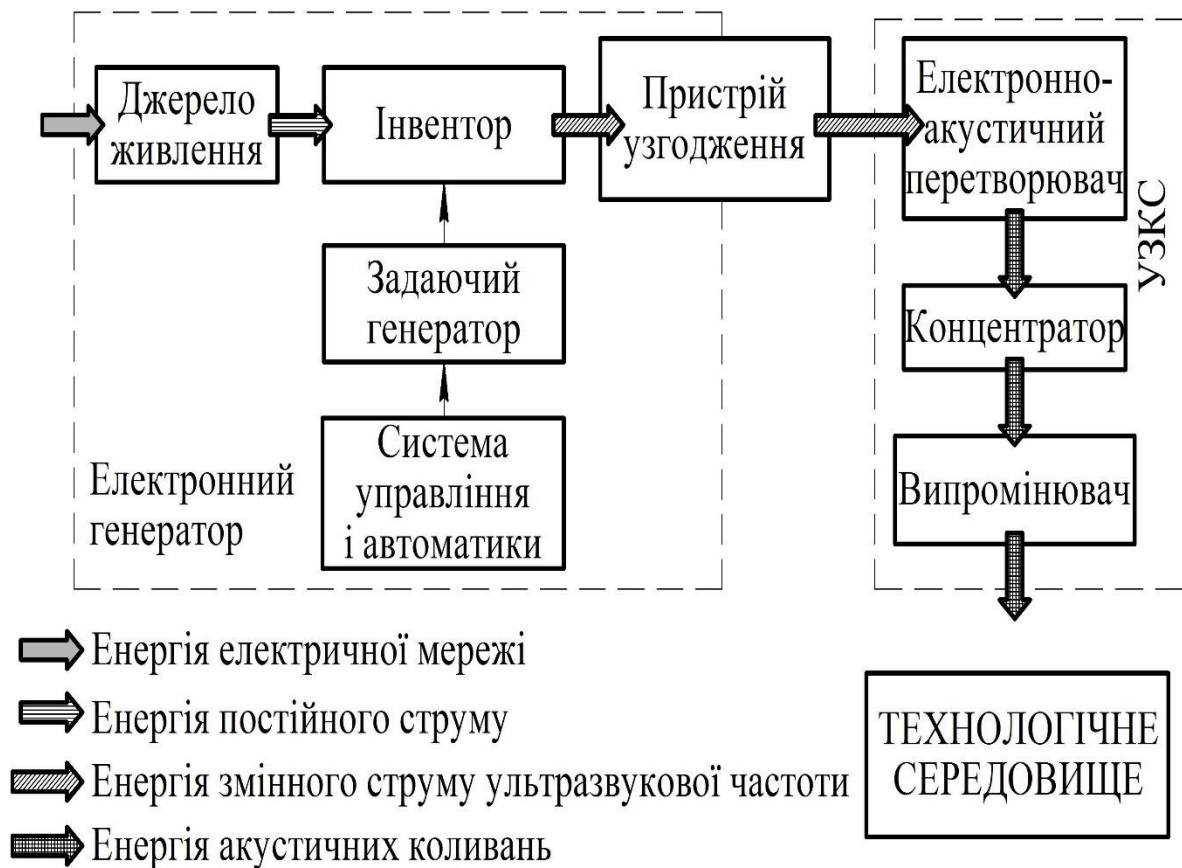


Рисунок 2.5 – Ультразвукова технологічна система

Розроблений на цій основі алгоритм [16, 43, 48] для побудови моделі (рис. 2.6) передбачає поетапне застосування системного аналізу та синтезу.

Послідовне осмислення фізичної суті та з'ясування механізму процесу кавітаційної обробки є передумовою обґрунтування вибору впливових параметрів для розробки моделі. Визначені структурно-механічні та реологічні властивості технологічного середовища складають структурну модель. Наступні три етапи алгоритму визначають розподіл зон і областей

розвиненої кавітації з урахуванням зміни фізичних властивостей оброблюваного дисперсного середовища.

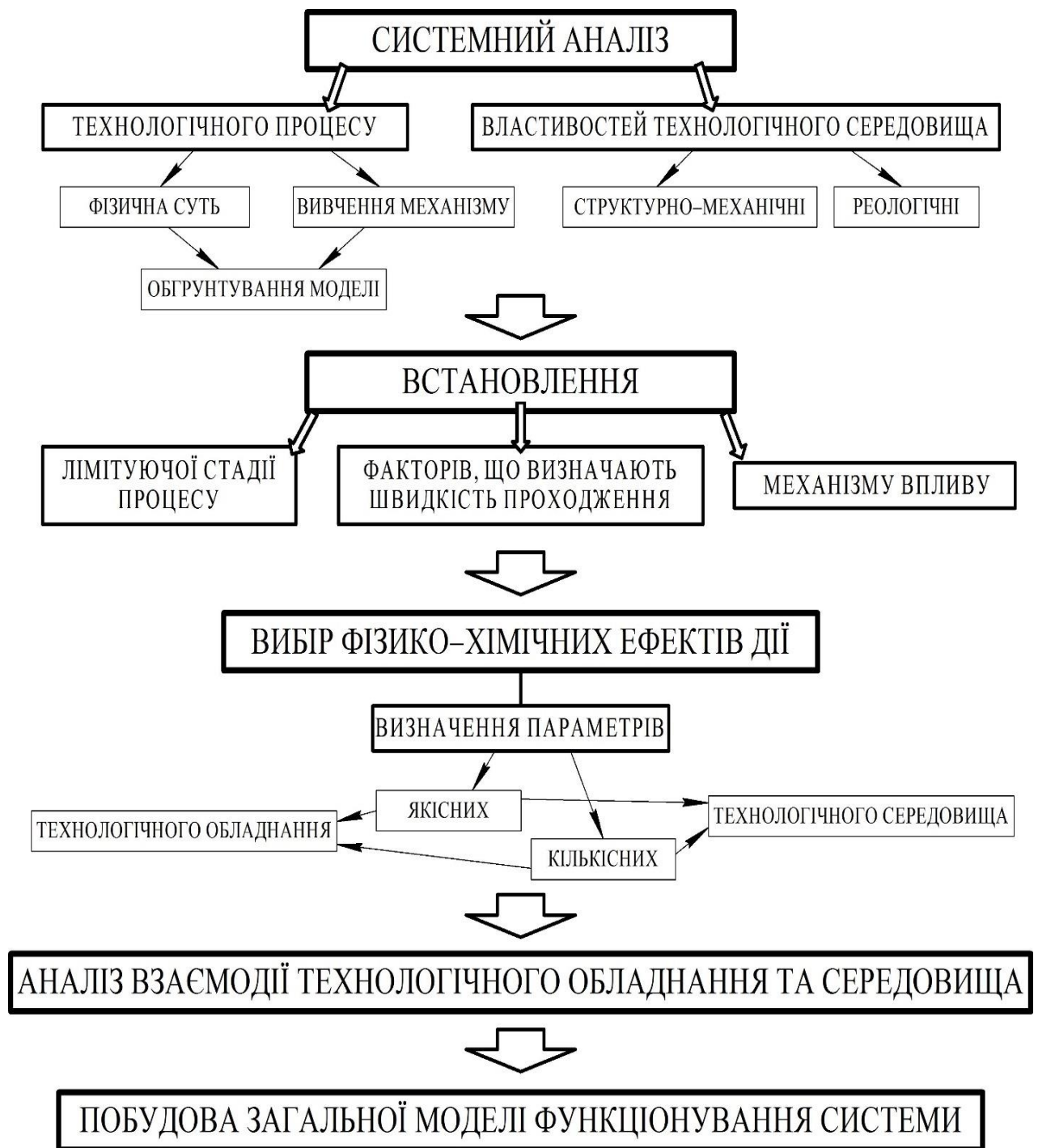


Рисунок 2.6 – Алгоритм проведення досліджень

Такий підхід дозволить більш осмислено та із меншою похибкою прийняти математичну модель для досліджуваних середовищ, розробити або,

з необхідності, вдосконалити методологію досліджень, результати яких достеменно дозволять визначити рівні складності кавітаційного процесу (див. рис. 2.6), розподіл зон і областей розвиненої кавітації з урахуванням зміни фізичних властивостей оброблюваного дисперсного середовища, якими є щільність, хвильовий опір, коефіцієнт поглинання та ін.

Основними реологічними властивостями будь-якого технологічного середовища являються пружні, в'язкі та пластичні. Їх визначення в умовах кавітаційної обробки ультразвуковими апаратами є ключовою задачею інтенсифікації протікання технологічного процесу. Очевидно, що при реалізації різних ультразвукових технологічних процесів будь-яке технологічне середовище являється навантаженням на ультразвуковий апарат. При заданому значенні акустичної потужності апарата на вході перетворювача амплітуда коливань повинна визначатися опором технологічного середовища. Існує декілька способів визначення опору технологічного середовища, які відрізняються між собою прийнятою моделлю середовища у вигляді дискретного або континуального. В будь-якому випадку при коливаннях незалежно від форми і частоти коливань опір технологічного середовища складається із інерційної, пружної та дисипативної частин [48, 51, 53]. Інерційно-пружні складові визначають, так званий, реактивний опір, а дисипативна складова – активний [196]. По аналогії із розглядом подібних процесів в електротехніці [233] цей загальний опір називається механічним імпедансом коливальної системи. Імпеданс є комплексною величиною, активна частина якого Z_a пов'язана з дисипативними втратами в коливальній системі, реактивна частина Z_p – з процесами періодичного обміну кінетичної енергії руху з потенційною енергією тіла:

$$Z = Z_p + iZ_a, \quad (2.18)$$

де i – уявна одиниця, що вказує поворот Z_a відносно Z_p на кут $\pi/2$.

Зміна реактивної складової навантаження середовища Z_p призводить до зміни резонансної частоти ультразвукової коливальної системи. Активна складова Z_a визначає активні втрати в оброблювальному середовищі (в тому

числі і корисну роботу) і пов'язана із зниженням амплітуди коливальної швидкості.

При резонансі коливальної системи відбувається взаємна компенсація інерційних і пружних сил. Реактивний опір системи становиться рівним нулеві, а імпеданс приймає мінімальне значення. Імпеданс окрім виду (2.14) та загального виду (2.18) може бути представлений як відношення сили F , що прикладена до будь-якої точки системи, до коливальної швидкості v в цій же точці:

$$Z = F/\omega, \quad (2.19)$$

де F і ω сила і швидкість відповідно.

Їхні вирази беруться із рішень хвильових рівнянь, що приведено в третьому розділі для конкретних моделей технологічних середовищ.

При визначенні параметрів, із яких формується модель процесу кавітації, виникає задача вимірювання швидкості розповсюдження акустичних хвиль (амплітуди, частоти, фази). Можливо застосувати для розрахунку швидкості і визначення інтервалів часу, які витрачаються на проходження відповідного шляху акустичними хвилями. Отже, важливим аспектом дослідження є оцінка та раціональний вибір методів вимірювання акустичних хвиль.

2.5 Методи вимірювання та контролю параметрів робочого процесу акустичної кавітаційної обробки робочих середовищ

Основні параметри робочого процесу акустичної кавітаційної обробки робочих середовищ можна за певною умовністю розділити на три групи: силові, енергетичні та власне середовища (рис. 2.7) [16–18, 45].

Інтенсивність кавітації, як визначального параметру визначення та оцінки ефективності протікання такого процесу визначають за швидкістю звукохімічних реакцій або за інтенсивністю сонолюмінесценції [232, 268, 298–303], по спектру сонолюмінесценції [305, 307–311]. Такі методи дозволяють оцінити температуру в момент сплескування бульбашок. В технологіях

ультразвукового очищення оцінка протікання процесу визначається за швидкістю руйнування зразків алюмінію або алюмінієвої фольги (ерозійний тест) [229, 230] або за визначенням потужності акустичного кавітаційного шуму в широкій смузі частот [242].

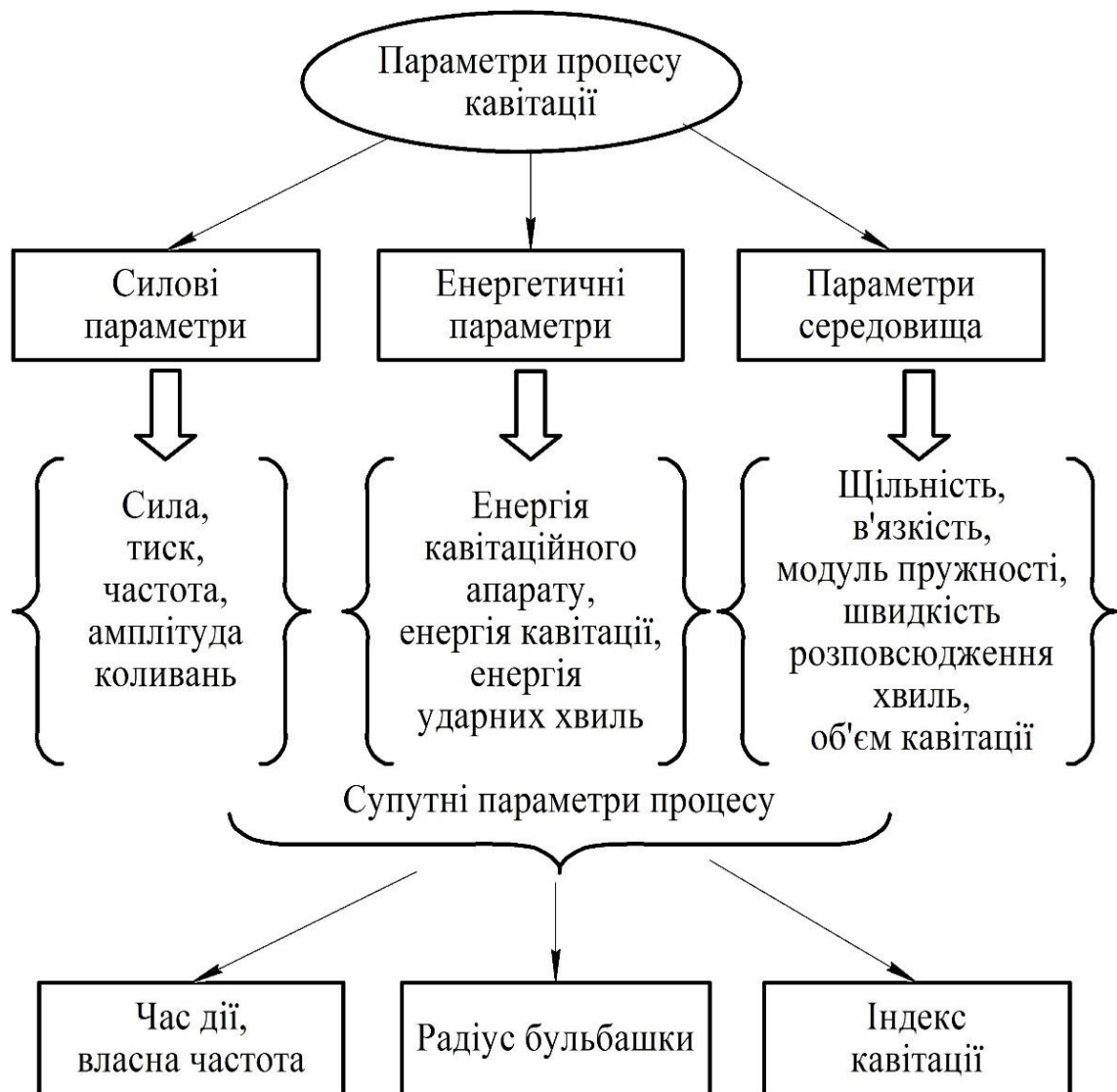


Рисунок 2.7 – Параметри кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ

Головний недолік всіх цих методів полягає в тому, що вони не дозволяють безпосередньо зв'язати ступінь адекватності реєстрованого ефекту з реальними параметрами пульсацій кавітаційних бульбашок. Такий

зв'язок можна простежити тільки гіпотетично при використанні тієї чи іншої моделі кавітаційного впливу на реєстрований ефект. З огляду на залежність пульсацій бульбашок від ряду інших параметрів, зазвичай не відомих або важко контрольованих, дані методи вимірювання інтенсивності кавітації не дозволяють зіставити результати, отримані на різних установках або в різних умовах.

2.5.1 Оцінка методів вимірювання акустичних хвиль при кавітаційній обробці робочих середовищ

Аналізуючи приведений алгоритм (див. рис. 2.7) та приведений вище текст, варто зазначити, що синтезуючим параметром процесу є енергія. Її передача від апарату до середовища супроводжується виникаючими акустичними хвилями, що розповсюджуються з певною швидкістю. Тому, при визначенні параметрів, із яких формується модель процесу кавітації, виникає задача вимірювання швидкості розповсюдження акустичних хвиль (її амплітуди, частоти, фази). Отже, важливим аспектом дослідження є оцінка та раціональний вибір методів вимірювання акустичних хвиль.. Методи вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль мають низку переваг і суттєві недоліки [144, 145, 198, 206, 216, 231, 232, 278, 338, 339].

Резонансний метод. Метод заснований на явищі акустичного хвильового резонансу між власними частотами коливальних зразка і відповідними частотами зовнішнього генератора (рис. 2.8). Діапазон частот – 0,1–15 МГц для твердих тіл.

На один з торців стержня діє періодична сила, яка виникає в результаті електростатичного протягування між електропровідною торцевою поверхнею стержня і нерухомим електродом. Постійна електрична напруга зміщення виключає виникнення другої гармоніки. Подібний пристрій використано в якості приймача. З метою виключення затухання, що пов'язано з випромінюванням звука в повітря систему поміщають у вакуум.

Оскільки зв'язок між механічною та електричною частинами схеми незначний, вплив параметрів електричного ланцюга при зміні резонансної частоти та добротності зразка можна не враховувати.

Переваги – можливість використання в широкому діапазоні частот.

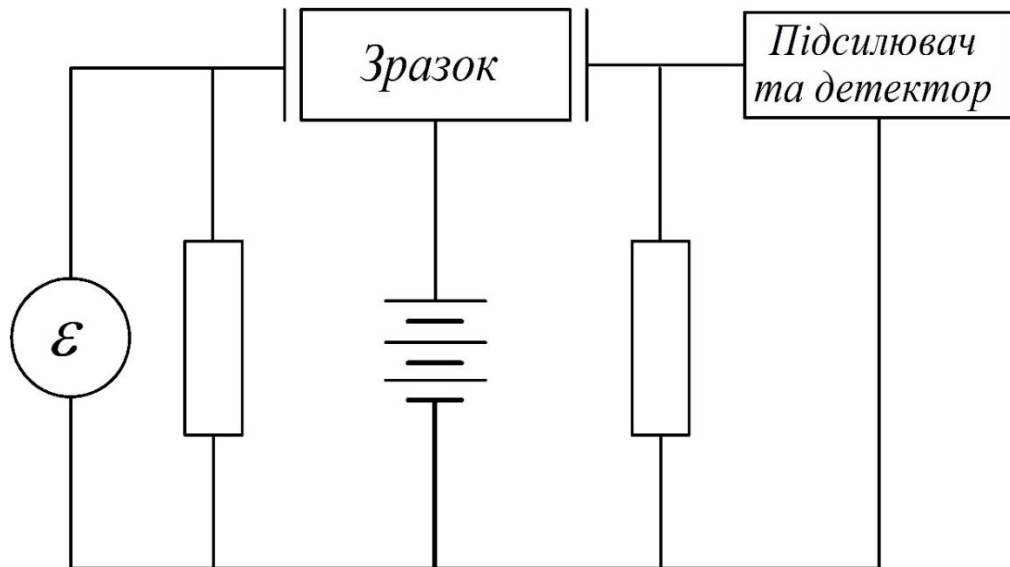


Рисунок 2.8 – Вимірювальна блок-схема

Для більшості випадків швидкість звуку визначається залежністю:

$$v_s = \omega/r = \omega_p l / n\pi = 2\nu_p l / n,$$

де $n=1, 2, 3, \dots$

Оптичні методи. Оптичним є спосіб отримання інформації про параметри пульсацій бульбашок. Цей метод заснований на явищі дифракції світла на ультразвуковій решітці (рис. 2.9).

Промені від джерела світла L збираються конденсатором K в щілині S , яка поміщається в фокусі об'єктиву O_1 , завдяки якому світло паралельним пучком проходить через ємкість з досліджуваною рідиною.

Всередині ємкості розміщено випромінюючий перетворювач Q , який формує ультразвукову хвилю, яка розповсюджується під кутом 90° до пучка світла. Об'єктив O_2 збирає промені на екрані B .

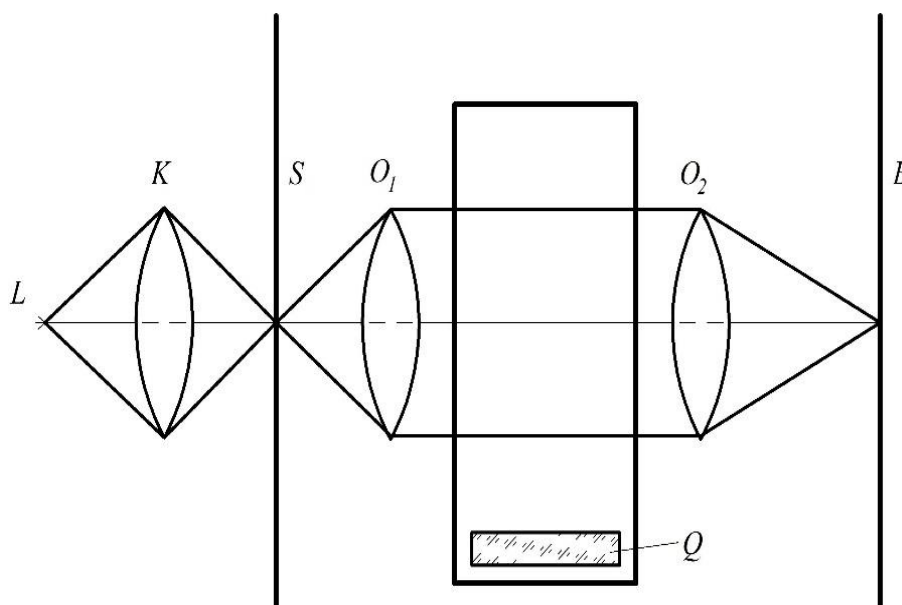


Рисунок 2.9 – Схема установки

Якщо перетворювач не збуджений, то на екрані спостерігається звичайне зображення щілини, за наявності ультразвукової хвилі на екрані окрім основного зображення щілини спостерігається дифракційні зображення декількох порядків (спектр). При кількісних вимірюваннях дифракційні спектри фотографують.

Виходячи з цього швидкість звуку визначається залежністю:

$$v_c = \omega \lambda,$$

де, ω – циклічна частота коливань п'єзоперетворювача.

Даний метод досить точний, точність вимірювання – 10^{-1} – $10^{-2}\%$.

Використовують для дослідження прозорих рідин, перегрітих та насичених парів, в критичній області систем рідина – пара та рідина – рідина.

Інтерферометричні методи засновані на створенні в просторі між випромінювачем і технологічним середовищем інтерференції падаючої і відбитої звукових хвиль. При цьому виникає просторовий розподіл акустичного тиску (або швидкості) в рідині, який періодично повторюється через половину довжини ультразвукової хвилі в досліджуваному середовищі.

Інтерферометри можна поділити наступним чином:

- працюючих на неперервних коливаннях;

- працюючих на імпульсах;
- з незмінною характеристикою акустичного поля при вимірюванні;
- зі змінною характеристикою акустичного поля при вимірюванні з одним перетворювачем;
- з двома перетворювачами.

Метод акустичного інтерферометра. Метод застосовується в діапазоні частот 0,1–20 МГц. При роботі інтерферометра перетворювач збуджує коливання на резонансній частоті. Полягає у вимірюванні зміни електричних параметрів в мережі п'єзоперетворювача при зміні відстані між перетворювачем і рефлектором (рис. 2.10).

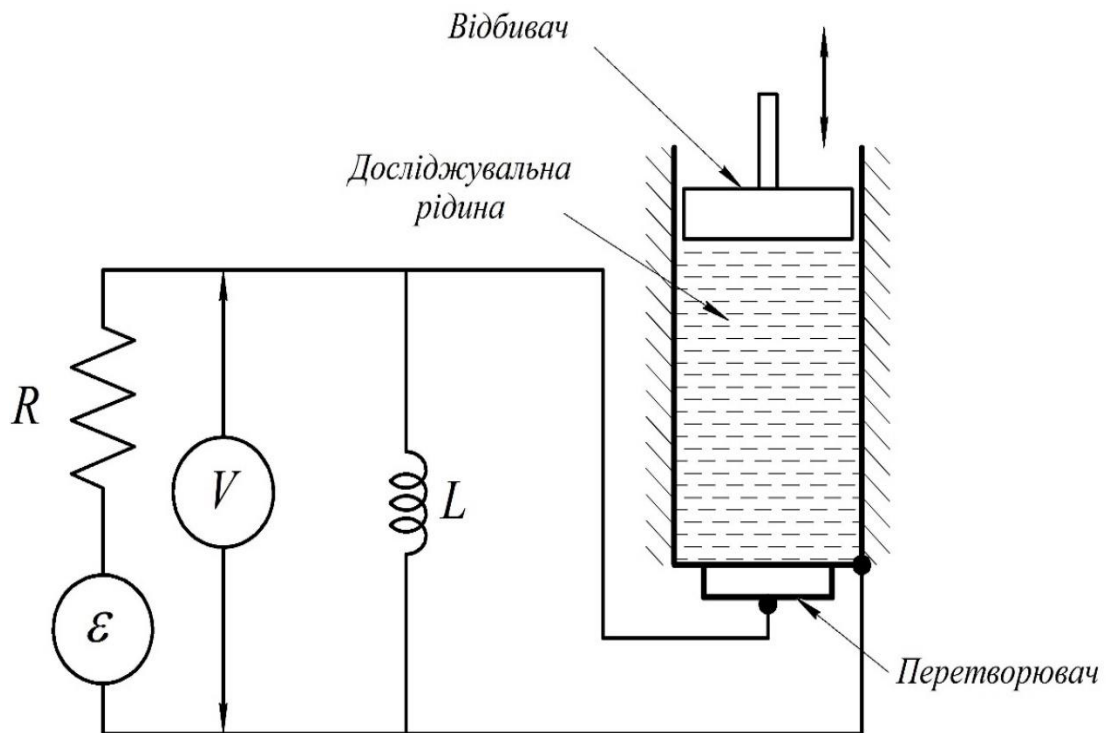


Рисунок 2.10 – Схема акустичного інтерферометра

Інтерферометр з одним перетворювачем. Відстань між сусідніми максимумами (або мінімумами) дорівнює половині довжини хвилі. Звідси швидкість звуку визначається як добуток частоти коливань на довжину хвилі.

Коефіцієнт згасання визначають шляхом вимірювання відношення послідовних максимумів амплітуди.

Інтерферометр з відбиттям від вільної поверхні рідини. Цей метод за умови достовірного регулювання рівня рідини дозволяє отримати ідеальне відбиття. Зміна висоти стовпа рідини реєструється зміною напруги на кварцовому перетворювачі. Метод характеризується простотою розрахунків.

Інтерферометр з двома перетворювачами. Сутність методу полягає у заміні відбивача інтерферометра приймачем – кристалічним перетворювачем, аналогічним до випромінювача. Амплітуда напруги на виході приймача за ступенем віддалення від випромінювача змінюється, послідовно проходить через максимуми та мінімуми, при чому відстань між двома сусідніми максимумами (мінімумами) точно відповідає половині довжини хвилі. Точність вимірювання швидкості звуку залежить від врахування впливу згасання, що особливо є важливим для в'язких середовищ.

Локаційні методи основані на локації від нерухомого випромінювача ультразвуку, розташованого ззовні об'єкту. Для локаційних методів випромінювання може бути безперервним (гармонійним і квазігармонійним) і імпульсним. В першому випадку інформація про параметри вібрації закладена в модуляції (амплітудній, частотній, фазовій) акустичного сигналу, в другому – в зміні часу проходження зондуючого імпульсу.

Зондуючі імпульсні сигнали можна випромінювати не лише в імпульсному режимі («пакети ультразвукових пружних хвиль»), але і в безперервному, за умови імпульсного кодування випромінюваних коливань з наступною ідентифікацією відповідних імпульсів на приймаючій стороні. Такі випромінювання можна віднести до безперервно кодованих, а за способом кодування – амплітудно-, частотно- та фазоімпульсними.

Реалізація локаційних методів можлива за умови усунення явища інтерференції, тобто забезпечення режиму хвилі, що біжить.

Імпульсний метод. Метод заснований на дії електричного імпульсу малої тривалості. Їх поділяють на абсолютні і відносні.

До абсолютних відносяться такі методи:

- прямий відлік часу розповсюдження ультразвукової хвилі на відомому відрізку шляху;
- використання виникнення стоячих хвиль в частках об'єму, в якому розповсюджуються коливання; – суперпозиції імпульсів, відрегульованих таким чином, щоб відстежувати зміну частоти сигналу і відсилати наступний пакет імпульсів в момент приходу луна-сигналу;
- кільцевих автоколивальних схем, що налаштовані на здійсненні самозапуску імпульсної системи за допомогою позитивного зворотного зв'язку.

Відносний метод вимірювання полягає у вимірюванні затримки в досліджуваному зразку у порівнянні з еталоном, швидкість звуку в котрому на робочих частотах відома або може бути розрахована. У якості відносного методу отримання інформації при вивченні кавітаційних явищ в акустичних полях можуть слугувати вимірювання рівня шуму і спектру акустичної дії [230–236], величини світлового потоку сонолюмісценції [229–240] в залежності від режиму акустичного впливу і параметрів рідини, яка знаходиться в кавітаційному стані. Вимір кавітаційного шуму використовується багатьма авторами і реалізовано в серійних приладах [236, 238–240], при цьому зазвичай аналізуються не спектральні компоненти, а потужність шуму в деякій смузі частот. Так, в роботі [225] використовується смуга від 5 кГц до 17,5 кГц при основній частоті коливань 28,5 кГц, а в роботі [236] – смуга частот від 20-ї до 40-ї гармоніки основної частоти.

В роботах [241, 253] показано, що амплітуди субгармонік дозволяють визначити фазу сплескування бульбашок, форму пульсацій і по співвідношенню субгармонік знайти амплітуду коливань випромінювача, відповідну максимальної інтенсивності кавітації. В описаних випадках досить аналізувати субгармоніки з частотами $1/3$ і $1/4$ від основної частоти випромінювача. Субгармоніки по суті не є шумом, а характеризують

акустичне випромінювання, перевипромінюване бульбашками, і несуть інформацію про параметри їх пульсацій.

Для генерування та виявлення ультразвукових хвиль застосовується широкосмуговий п'єзоелектричний перетворювач (з лінією затримки або без неї). У залежності від характеристик п'єзоелемента перетворювач генерує або поздовжні, або поперечні ультразвукові хвилі. Контакт його з матеріалом відбувається через відповідний сполучний прошарок (рис. 2.11). Слід також зазначити, що використання додаткового прошарку витікає із умови узгодження акустичних імпедансів.

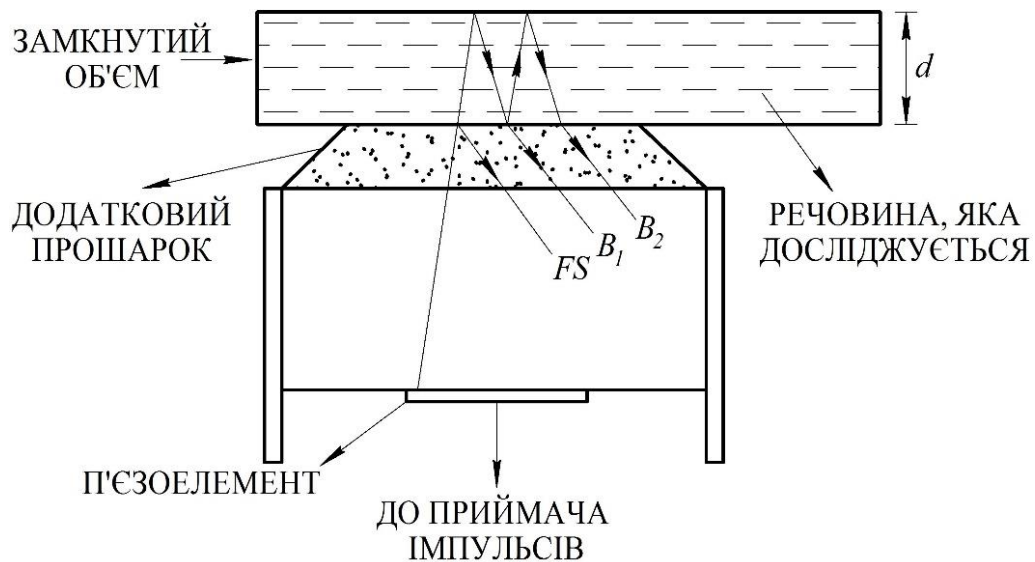


Рисунок 2.11 – Схема вимірювання швидкості звуку імпульсним методом

Поздовжні або поперечні ультразвукові хвилі проходять через кварцовий буфер до зразку. На передній поверхні зразка частина енергії переходить в нього, а інша частина відбивається назад в п'єзоелемент. Відбиті ультразвукові хвилі називаються луною передньої поверхні FS (див. рис. 2.11). Хвиля, яка проходить в зразок, відбивається від його задньої поверхні називається луною B_1 . Частина відбитої хвилі знову відбивається від передньої

поверхні, а потім від задньої. Друге відбиття від задньої поверхні формує відлуння B_2 .

Спостереження за картиною луна-сигналів дозволяє виміряти швидкість та згасання звуку. Для вимірювання швидкості звуку потрібно визначити точний час пробігу від передньої до задньої поверхні зразка. Вимірювання ультразвуку в менш твердих матеріалах має певні труднощі, пов'язані з проблемою перекидання фази луна-сигналів відбитих від задньої поверхні. Це призводить до зміни зовнішнього вигляду луна-сигналів від задньої поверхні, тобто до появи послідовного чергування луна-сигналів вихідної форми і їх дзеркальних відображень. У результаті вимірювання часу пробігу закладаються помилки вимірювання. Вирішення проблеми можливе шляхом розгляду у вимірах чергування луна-сигналів, а не сигналів однакової форми. Згідно іншого способу, необхідно попередньо провести перекидання фази луна-сигналів за допомогою електронних засобів.

До імпульсних методів підвищеної точності вимірювання характеристик розповсюдження ультразвукових хвиль відносять:

- циклічне збудження;
- накладення імпульсів;
- перекриття луна-імпульсів;
- взаємна кореляція;
- прямий.

Метод циклічного збудження. Цей метод відноситься до автоматизованого способу, який застосовують лише для відносних вимірювань швидкостей ультразвуку (рис. 2.12).

Електричний імпульс від передавача направляється на передавальний перетворювач, який генерує ультразвукові хвилі у зразку. Передній фронт прийнятого від зразку і посиленого сигналу використовується для генерації імпульсного сигналу, який ініціює новий імпульс в передавачі.

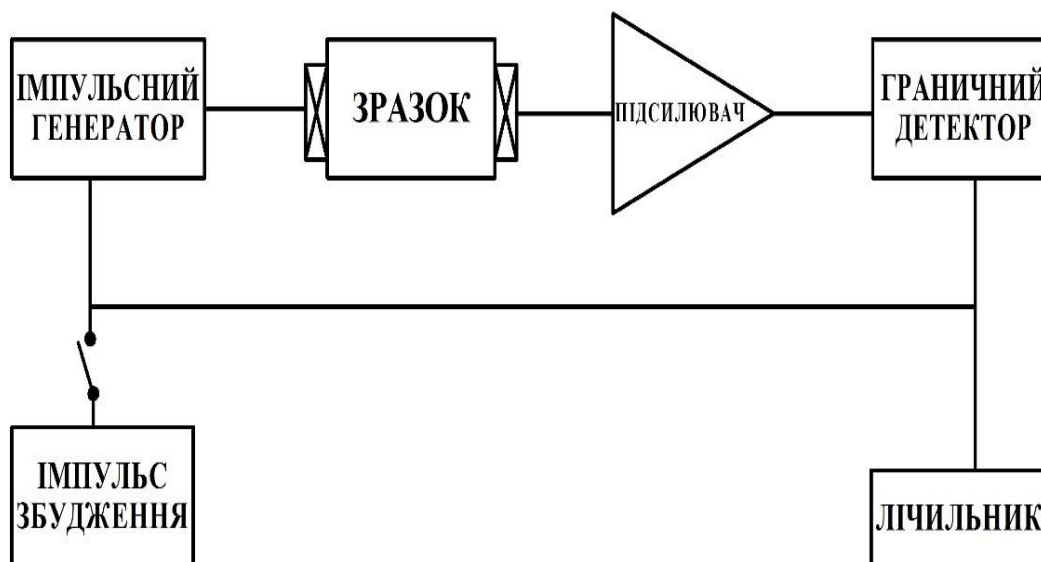


Рисунок 2.12 – Блок-схема методу циклічного збудження

Так відбувається циклічно, починаючи з моменту виникнення імпульсу. Лічильник вимірює кількість сигналів запуску в секунду. Очевидно, що тривалість одного циклу перевищує час проходження імпульсу в зразку. Це обумовлено електричними затримками, пов'язаними з запуском передавача, часом наростання та посилення імпульсу, генерацією сигналу запуску, акустичними затримками в двох перетворювачах і їх контактах зі зразком.

За умови можливості вимірювання та коригування усіх зазначених затримок, абсолютна точність системи перевищувала б $1/104$ [126].

Метод накладання імпульсів. У цьому методі для передачі і прийому ультразвукових хвиль використовується один і той же перетворювач (рис. 2.13).

На перетворювач подаються строб-імпульси радіочастоти з регульованим тимчасовим інтервалом між ними. Перетворювач, у свою чергу, генерує в зразок послідовність імпульсів, що призводить до виникнення цуга луна-сигналів.

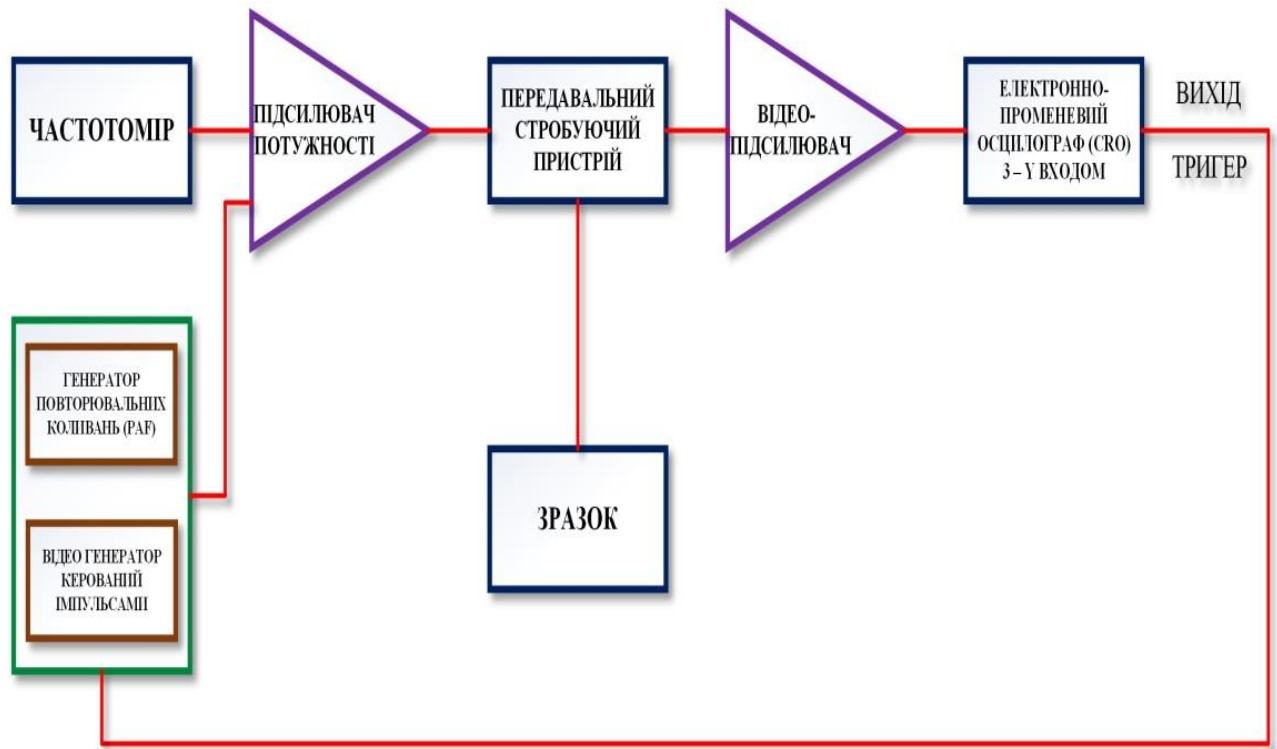


Рисунок 2.13 – Блок-схема методу накладання імпульсів

Часовий інтервал підбирається таким чином, щоб відлуння першого переданого імпульсу потрапляло в часовий інтервал наступного імпульсу. Перевага даного методу полягає в тому, що його можна автоматизувати.

Метод перекриття луна-імпульсів. Цей метод застосовують для відносних і абсолютних вимірювань швидкості звуку. Відносні вимірювання проводять для визначення зміни швидкості звуку в рідинах та газах як функцію зовнішніх параметрів: температури, тиску і т.д. Абсолютні виміри проводяться з метою визначення постійних пружності і, отже, отримання повної характеристики матеріалів.

Реалізація методу перекриття полягає у вимірюванні перекривання двох сигналів, один з яких – луна-сигнал, а інший – прямий імпульс на осцилоскопі (рис. 2.14).

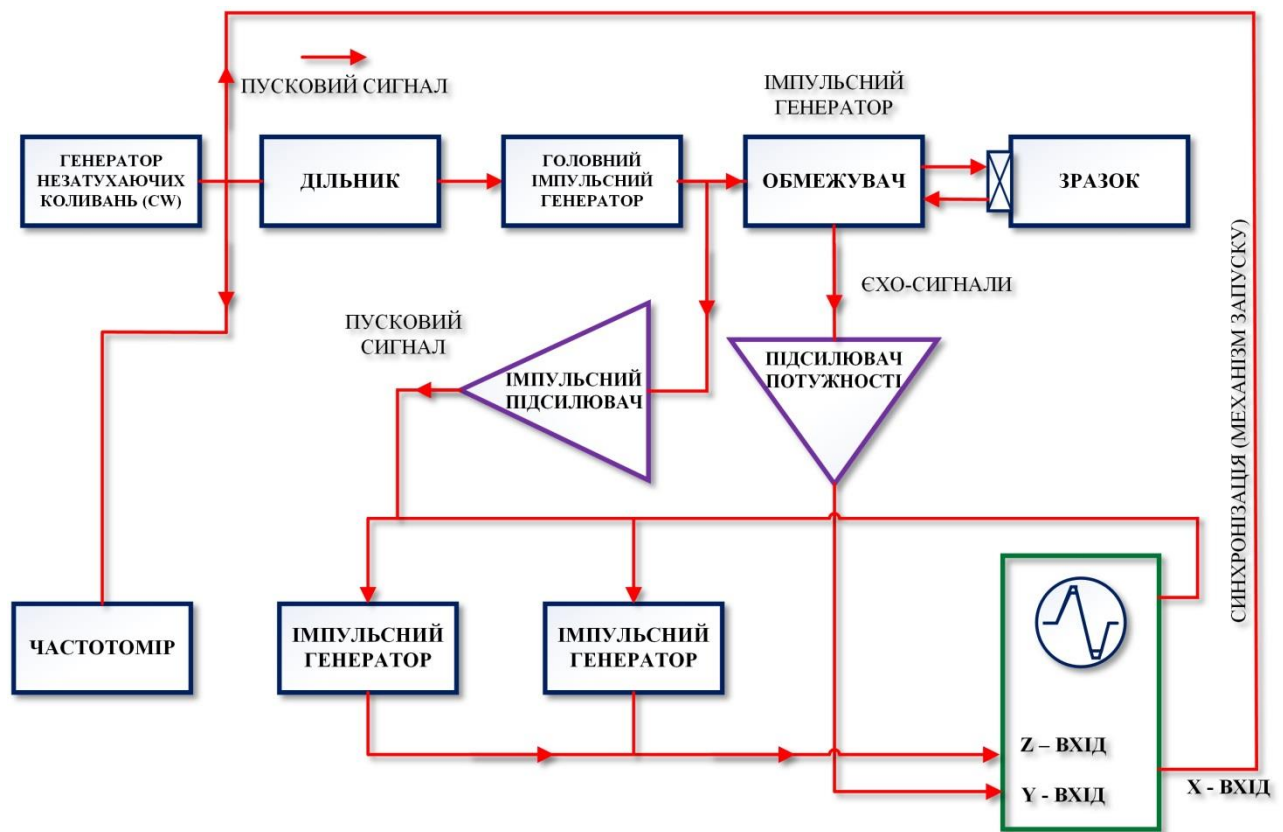


Рисунок 2.14 – Блок-схема методу перекриття луна-імпульсів

Перекриття може бути реалізовано подачею на пластини змінної напруги період якої дорівнює інтервалу між цими двома сигналами. Тоді перший сигнал з'явиться на одній розгортці осцилоскопа, а другий – на наступній. Необхідна змінна напруги подається на пластини горизонтальної розгортки осцилоскопа з генератора повторюваних імпульсів, частота якого варіюється від 6 до 700 кГц.

Щоб перекривання відбувалося без дрижання, сигнали синхронізують з фазою напруги незгасаючих коливань за допомогою генерування вхідних імпульсів повторюваної частоти з фази напруги генератора незгасаючих коливань за допомогою дільника частот. Дільник частот видає пусковий сигнал, що синхронізований з фазою напруги генератора незгасаючих коливань. Цей сигнал, у свою чергу, запускає головний імпульсний генератор, який збуджує перетворювач. Діодний обмежувач виступає в ролі передавального стробуючого пристрою і захищає підсилювач приймача від

перевантаження вхідним імпульсом. Найбільш поширена частотна характеристика головного імпульсного генератора знаходиться в діапазоні від 400 кГц до 20 МГц, а час зростання становить 5 наносекунд. Луна-сигнали, прийняті від зразка, передаються на підсилювач потужності, а потім на У-вхід осцилоскопа.

2.5.2 Аналітичні та експериментальні методики визначення параметрів та контролю процесів кавітаційної обробки технологічних середовищ

З метою аналізу, приведених вище загальних схем вимірювання, розглянемо картину розповсюдження ультразвукових хвиль в проміжку L між випромінювачем і відбивачем. При випромінюванні гармонійних коливань тиск в будь-якій точці x , обрахований від випромінювача, може бути виражений залежністю по аналогії із переміщенням [14, 15]:

$$p(x) = e^{j\omega t} [P_i e^{(\alpha + jk)x} + P_q e^{(\alpha - jk)x}], \quad (2.20)$$

де $\omega = 2\pi f$ – частота ультразвуку; P_i – амплітуда падаючої хвилі в точці $x = 0$; P_q – амплітуда відбитої хвилі в точці $x = 0$; α – коефіцієнт згасання; k – хвильовий коефіцієнт, $k = (\frac{2\pi}{\lambda})$.

Якщо відбивач, на якого падає хвиля, ідеальний, то $P_i = P_q$, в інших випадках $P_q = RP_i$, де R – коефіцієнт відбивання.

Вираз (2.20) можна представити у вигляді:

$$P(x) = P(x) e^{j(\omega t + \varphi)}, \quad (2.21)$$

де

$$P(x) = (P_q^2 e^{-2\alpha x} + P_i^2 e^{2\alpha x} + 2P_i P_q \cos 2kx)^{1/2}, \quad (2.22)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_q e^{-\alpha x} - P_i e^{\alpha x}}{P_q e^{-\alpha x} + P_i e^{\alpha x}} \operatorname{tg} kx. \quad (2.23)$$

Розглянемо залежність фази ультразвукової хвилі від переміщення x , що відповідає режиму бігучої хвилі.

Для загального випадку ($R \neq 0$) вираз (2.23) для фази ультразвукової

хвилі запишемо у вигляді:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{1-Re^{-2\alpha x}}{1+Re^{-2\alpha x}} \operatorname{tg} kx\right). \quad (2.24)$$

Лінійна залежність фази від відстані має місце тільки при $Re^{-2\alpha x} = 0$, тобто при $R = 0$, або при $e^{-2\alpha x} = 0$. Умову $R = 0$ отримати практично не можливо, тому необхідно використовувати або велике згасання ультразвуку, так, що $e^{-2\alpha x} \rightarrow 0$, або розсіювати енергію деякими способами. Якщо датчик ультразвукових коливань розташований на поверхні контакту апарату з середовищем, то фаза його вихідного сигналу щодо випроміненого визначається виразом (2.24). Для ехо-методу справедливе співвідношення:

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} x. \quad (2.25)$$

При колюванні акустичного апарату за гармонійним законом $x = X_0 \sin \omega t$ виходить фазова модуляція, з індексом модуляції $\Phi = \frac{n4\pi}{\lambda} X_0$ ($n = 1$ для методу наскрізного прозвучування, $n = 2$ – для ехо-методу).

Діапазон вимірюваних амплітуд коливань контактної зони X_0 залежать від довжини хвилі ультразвуку λ і меж пристрою для вимірювання фаз Φ_{\min} і Φ_{\max} . Наприклад, широкодіапазонний фазометр, що має практично необмежені межі [126], може забезпечувати вимірювання переміщення від одиниць мікрометрів до сотень міліметрів. Частотний діапазон вимірюваної вібрації в фазових системах не має обмежень знизу, а зверху обмежений частотою несучих коливань.

При випромінюванні амплітудно-модульованої хвилі з тональною модуляцією вираз для тиску в будь-якій точці на відстані x від вихідного положення контактної пристрою апарату буде мати вигляд [244]:

$$P(x, t) = P e^{\alpha x} \left[1 + m \cos(\omega_M t + \frac{nx}{c} \omega_M) \right] \cdot \cos(\omega t + \frac{nx}{c} \omega), \quad (2.26)$$

де m – глибина модуляції; ω_M – кутова частота модуляції; $n=1, 2$.

Фаза гармонійної обвідної отримує спрощення $\frac{nx}{c} \omega_M$, пропорційне вимірюваному переміщенню x . У порівнянні з приростом фази несучої $\frac{nx}{c} \omega$ впливає, що при одному і тому ж переміщенні x зміни фазового зсуву, а отже,

і чутливість в амплітудно-фазовому методі в ω/ω_M разів менше, ніж у фазовому. Тому розглянутий метод придатний в основному для вимірювання великих переміщень.

Вимірювання фази по обвідній не виключає одночасного вимірювання фази несучої і тоді можливості методу розширюються. Однак, при використанні звичайного фазометра $\pm 180^\circ$ можуть виникнути деякі труднощі, пов'язані з узгодженням діапазонів (потрібне перекриття останніх звукує межі вимірюваних переміщень). За використання частотного методу (ефекту Доплера) для частоти сигнал Доплера $f\partial$ найбільш часто використовують формулу виду [247]:

$$f\partial = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} = f_0 \frac{nv(t)}{c}, \quad (2.27)$$

де $\varphi(t)$ – фаза сигналу; f_0 – частота випромінюваних ультразвукових коливань; $v(t)$ – швидкість переміщення об'єкта (в даному випадку віброшвидкість); $n=1, 2$.

При коливанні будь-якого об'єкта згідно закону за рахунок ефекту Доплера виходить частотна модуляція несучих ультразвукових коливань, виділення якої на приймальній стороні дає інформацію про віброшвидкість $v(t)$. Чутливість вібровипромінювальних приладів на ефекті Доплера і межі виміру залежать, в першу чергу, від детектора ЧС-коливань. Найбільш ефективний частотний метод на середніх і високих частотах, де є можливість вимірювання віброшвидкостей від десятих і сотих часток мм/с до сотень мм/с. Частотний діапазон досить широкий: знизу він обмежений лише низькочастотними шумами в дискримінаторі і чисельно визначається залежно від діапазону вимірюваної віброшвидкості, а зверху обмежений частотою ультразвуку.

Вираз для часу пробігу зонduючого імпульсу $\tau(t)$ із використанням імпульсного методу має вигляд [247]:

$$\tau(t) = \frac{n[L+x(t)]}{c}, \quad (2.28)$$

де L – відстань від контактної зони випромінювача до граничного розміру

середовища у напрямку розповсюдження хвилі; $x(t)$ – вібраційний процес; $n=1, 2$.

Зазвичай інтервал часу $\tau(t)$ перетворюють в імпульс напруження цієї тривалості. При випромінюванні послідовності імпульсів і наявності вібрації акустичного апарату на робоче середовище після деякого перетворення отримують широтно-модульовані імпульси, кожен з яких миттєво відображає відстань від випромінювача до граничного розміру середовища у напрямку розповсюдження хвилі. Виділення із спектру широтно-модульованих імпульсів сигналу вібрації дає інформацію про вібропереміщення $x(t)$.

Роздільна здатність вібровимірювального приладу зв'язується з флуктуаціями моменту фіксації імпульсу, що пройшов:

$$\Delta x = c\Delta t, \quad (2.29)$$

де c – швидкість звуку.

Для амплітудно-імпульсної модуляції час Δt визначається в, першу чергу, непостійністю форми і величини сигналу. У свою чергу, при випромінюванні ультразвукових сигналів величина і форма прийнятого сигналу залежать від стану середовища, наявності інерційних елементів в тракті випромінювання і прийому, стану поверхні, що відбиває сигнал та ін. Роздільна здатність у розглянутому випадку при раціональному виборі всіх параметрів акустичного та електронного трактів і сприятливих умовах поширення ультразвуку в середовищі може бути доведена до десятих часток міліметра, що дозволяє цей метод використовувати в практиці досліджень. Для частотно-імпульсної модуляції час Δt визначається в основному станом середовища (непостійністю швидкості звуку) і ступенем досконалості електронних вузлів, і не залежить від форми і величини прийнятого сигналу. Зазвичай роздільна здатність частотно-імпульсного методу на порядок вище роздільної здатності амплітудноімпульсного методу.

Імпульсний метод істотно обмежений за частотним діапазоном вимірюваних вібрацій зверху, що пов'язано з дискретним станом інформації та її відновленням. Оскільки частота проходження імпульсних посилок

вибирається з умови:

$$F_{\max} = \frac{1}{T} = \frac{C_{\min}}{L_{\max}}, \quad (2.30)$$

де a – верхня гранична частота $F_{\text{гр}}$ відновлення сигналу із заданою похибкою $\delta\%$, з ШІМ – послідовності визначається частотою F_{\max} через відоме співвідношення (2.30):

$$F_{\text{гр}} = \frac{F_{\max} \sqrt{\delta}}{22,2} [\text{Гц}]. \quad (2.31)$$

Тоді для всіх реальних значень відстаней звуколокації $L = 0,1 - 1$ м при $c = 330 \text{ м/с}$ максимальна частота вібрації F_{\max} не може перевищувати десятків Гц, що звужує застосування цього методу для акустичних вимірювань.

Проведений огляд методів визначення та контролю параметрів кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ засвідчує, що вони засновані на:

- вимірювані параметрів ультразвукового випромінювача;
- визначенні параметрів пульсуючих бульбашок і кавітаційної області;
- визначенні інтенсивності кавітації.

Методи вимірювання параметрів ультразвукового випромінювача.

До даних методів належать вимір амплітуди коливань випромінювача, вимірювання акустичної потужності і електричної потужності, споживаної перетворювачем.

Вимірювання амплітуди коливань випромінювача. Амплітуда коливань випромінювача є важливим параметром, що суттєво впливає на процес пульсацій кавітаційних бульбашок [14,15,17,18,24-27]. Якщо слідувати існуючим підходам [184,185], то для визначення амплітуди коливань випромінювача рух бульбашки можна представити системою з однією свободою волі:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_0 \sin \omega t, \quad (2.32)$$

де бульбашка масою m рухається під дією змінної змушуючої сили F ; b – коефіцієнт в'язкого опору; c – коефіцієнт пружності.

Змушуюча сила $F(t)$ змінюється за гармонійним законом з амплітудою F_0 і частотою.

Можна передбачити, що шукана функція переміщення бульбашки виражається рівнянням [184]:

$$x = A_0 \sin(\omega t - \phi), \quad (2.33)$$

де A_0 – амплітуда коливань бульбашки, а ϕ – кут зсуву фаз між переміщенням і змушуючою силою.

Після підстановки (2.33) в (2.32) та нескладних перетворень знайдемо амплітуду переміщення:

$$A_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(c - m\omega^2)^2 + (b\omega)^2}}. \quad (2.34)$$

Вираз для визначення кута зсуву фаз:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{b\omega}{c - m\omega^2}. \quad (2.35)$$

Як випливає з (2.35), кут зсуву фаз ϕ оцінює опір бульбашки.

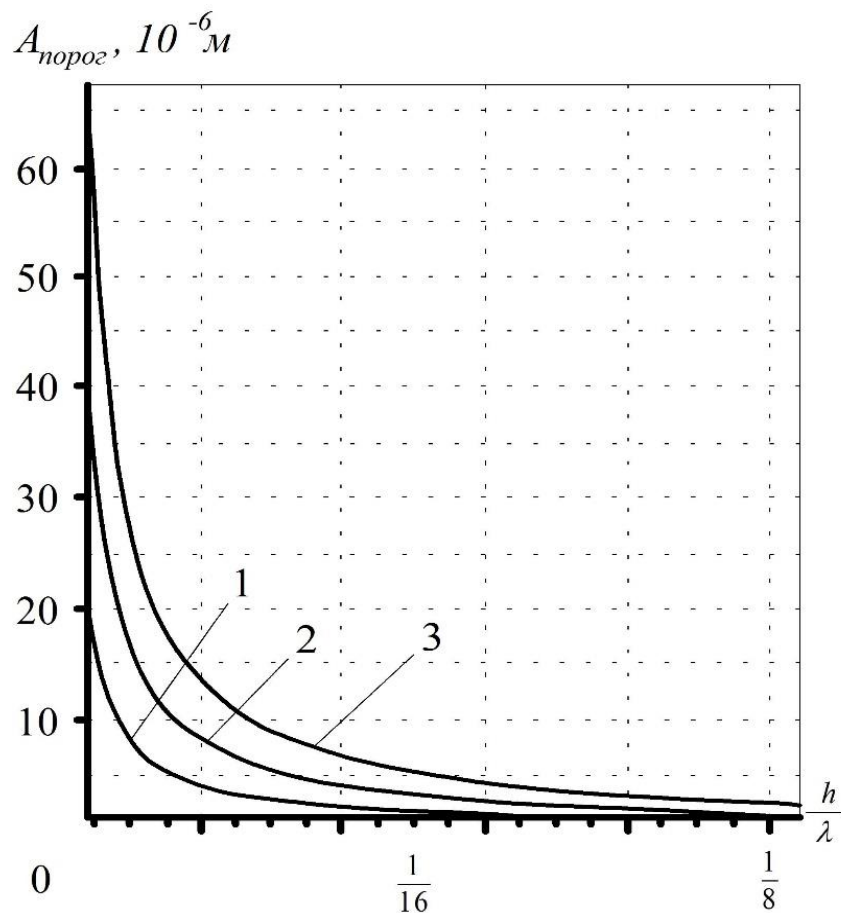
Амплітуда коливань випромінювача A впливає на амплітуду звукового тиску P_m , що безпосередньо діє на бульбашку:

$$P_m = \rho_k c_k \omega A, \quad (2.36)$$

де ρ_k, c_k – щільність і швидкість звуку в кавітуючій рідині.

Зміна амплітуди коливань випромінювача від співвідношення висоти шару до довжини хвилі для різних коефіцієнтів в'язкості приведена на рис. 2.15 [99].

Із графіків випливає, що окрім акустичних параметрів на порогові значення амплітуди коливань випромінювача має вплив в'язкість середовища. Окрім амплітуди коливань випромінювача на параметри кавітаційної обробки середовища здійснюють істотне значення й інші фактори, зокрема, модуль пружності, швидкість звуку в кавітаційній області, відстань від випромінювача, температура і газовміст рідини, склад і концентрація розчинених домішок.



1 – 1 мПа·с; 2 – 200 мПа·с; 3 – 400 мПа·с

Рисунок 2.15 – Зміна амплітуди коливань випромінювача від співвідношення висоти шару до довжини хвилі для різних коефіцієнтів в'язкості

Модуль пружності та швидкість звуку в кавітаційній області. Порушення суцільності рідини під дією зовнішньої сили призводить до утворення нової системи «рідина – бульбашка». Наявність повітря значно зменшує об'ємний модуль пружності E і швидкість звуку $c_k = \sqrt{E/\rho_k}$. Щільність кавітуючого середовища при цьому зменшується через малу об'ємну концентрацію бульбашок.

Падіння швидкості звуку в суспензії газових бульбашок в рідині [85, 141, 172] може призводити до суттєвого зменшення хвильового опору, який визначається наступною залежністю:

$$\rho_k c_k = \rho_0 c_0 \left[\frac{1}{1 + K \beta_{\text{п}} / \beta_0} \right]^{1/2}, \quad (2.37)$$

де K – індекс кавітації, $\beta_{\text{п}} / \beta_0$ - відношення стисливості парогазової суміші в бульбашках до стисливості рідини, для води $\beta_{\text{п}} / \beta_0 \approx 10^4$ [138].

Коефіцієнт індексу кавітації K дорівнює середній за часом об'ємній концентрації бульбашок:

$$K = \frac{\sum_i V_i}{V_p + \sum_i V_i},$$

де V_p – об'єм рідини без бульбашок, V_i – середній об'єм кавітаційної бульбашки, $i = 1, N$, N – число бульбашок.

Із залежності (2.37) дійсно впливає факт суттєвого зменшення хвильового опору. Так, залежність хвильового опору середовища від індексу кавітації (рис. 2.16) [99] засвідчує, що при індексі кавітації всього 0,2% хвильовий опір, а отже і амплітуда діючого на бульбашки звукового тиску зменшується майже в п'ять разів. Подібні графіки мають місце і в інших роботах [58–62, 65, 68–77].

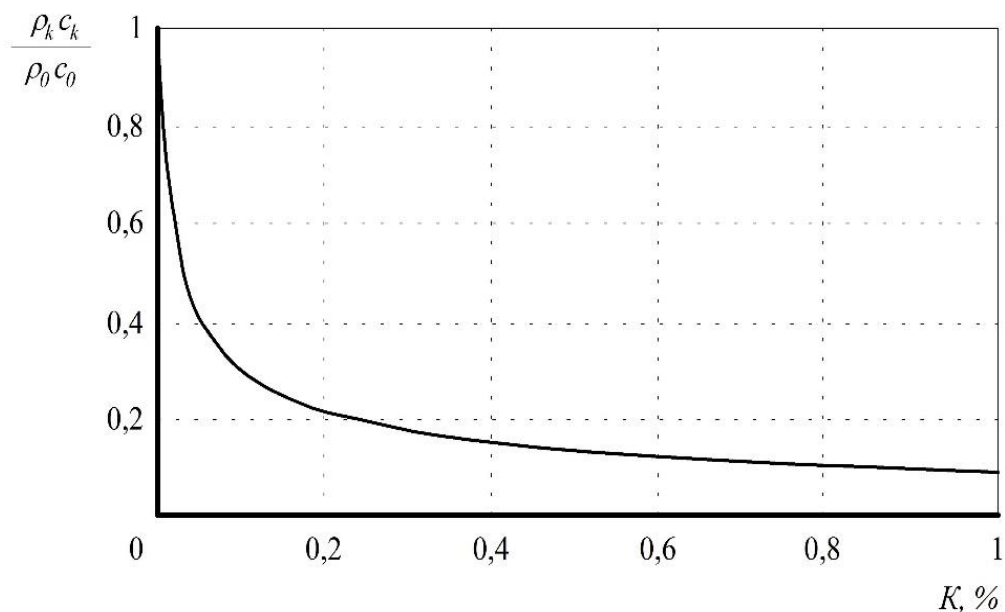


Рисунок 2.16 – Залежність зміни хвильового опору середовища від індексу кавітації

Така вражаюча відмінність в акустичних параметрах рідин і газів, що також опосередковано підтверджена характером і числовими значеннями різкої зміни хвильового опору (див. рис. 2.16) засвідчує, що виникає нова проблема вивчення змін акустичних параметрів середовища у часі і в конкретних умовах розвитку кавітаційного процесу з очевидною необхідністю врахування цих змін при визначенні як режиму, так і параметрів протікання технологічного процесу.

Очевидним є той факт, що будь-який етап процесу кавітації представляє собою взаємодію кавітатора з середовищем із суттєвою зміною основних їхніх характеристик. Таким чином, при виникненні в рідині ультразвукової кавітації, її акустичні властивості істотно змінюються, що потребує зміни режиму і параметрів перенесення енергії від ультразвукового випромінювача в технологічне середовище.

Такий принциповий висновок, що технологічне середовище, безпосередньо взаємодіючи з робочим органом ультразвукової коливальної системи, є її акустичним навантаженням, і зі зміною у часі своїх властивостей є новим джерелом навантаження в будь-який момент зародження, розвитку та захоплення кавітаційних бульбашок і таке середовище прямо впливає на вибір параметрів ультразвукового кавітатора. При цьому вихідною величиною для розрахунків параметрів системи «кавітатор – середовище» являється саме опір навантаження технологічного середовища. Цей факт є принципово важливим при визначенні режимів та параметрів кавітаційного процесу.

Відстань від випромінювача. При віддаленні від випромінювача амплітуда звукового тиску зменшується внаслідок того, що звукові хвилі не є плоскими, а також через вплив самої кавітаційної області. Відбуваються втрати енергії звукової хвилі на утворення бульбашок і до екранування поширення хвилі через зменшення хвильового опору в кавітуючому середовищі (див. рис. 2.13).

Розрахунки показують, що в воді при кімнатній температурі на частоті 26,5 кГц порогу виникнення кавітації відповідає амплітуда випромінювача

біля 0,4 мкм [99].

Отже, за амплітуди випромінювача 40 мкм при проходженні через кавітаційну область висотою всього кілька см амплітуда звукового тиску падає приблизно в 100 разів. Крім того, на амплітуду звукового тиску впливає розташування і властивості меж, які можуть призводити до утворення стоячих хвиль.

Температура. Температура впливає на багато параметрів, що входять в рівняння пульсацій бульбашок. В [73] експериментально показано, що інтенсивність кавітації на частоті 34 кГц в деіонізованій воді, визначається по інтенсивності акустичного «білого» шуму, який змінюється більш ніж в 50 разів при зміні температури води від 20⁰С до 60⁰С, причому інтенсивність кавітації залежить також від траєкторії нагрівання та охолодження.

Вміст газу. Вміст газу впливає на початковий рівноважний радіус зародків кавітації. Чим він нижче, тим вище швидкість сплескування і максимальний тиск в звуковій хвилі [73]. При порушенні кавітації в рідині спочатку відбувається її часткова дегазація з наступною зміною параметрів пульсацій бульбашок. Таким чином, початковий вміст газу і процес кавітації рідини також впливає на параметри ультразвукової кавітації [73].

Склад і концентрація розчинених домішок. Склад і концентрація розчинених домішок впливають на параметри пульсації бульбашок. Так, поверхневий натяг значно зменшується (на десятки відсотків) при розчиненні жирних кислот [62, 65, 68–70, 72] і збільшується при розчиненні солей, що згідно [68], в більшості випадків збільшує ступінь проявлення кавітаційних ефектів [68]. Збільшення в'язкості підвищує поріг виникнення кавітації [96], зменшує максимальний радіус бульбашок і енергію кавітації, в той же час збільшуючи швидкість сплескування бульбашок [97].

Таким чином, по одній тільки амплітуді коливань випромінювача неможливо судити про параметри пульсацій кавітаційних бульбашок. Використання амплітуди коливань для кількісного опису кавітаційних ефектів має сенс при відомих і незмінних параметрах середовища, в іншому випадку

вона дозволяє тільки зіставляти ефекти, що виникають в подібних умовах.

Вимірювання акустичної потужності. Акустична потужність збільшує кількість бульбашок в кавітаційній області, підвищуючи ефективність кавітаційних процесів [69]. З іншого боку, кавітаційна область впливає на випромінювану акустичну потужність, так як зменшення хвильового опору середовища при зростанні індексу кавітації пропорційно зменшує випромінювану акустичну потужність [98]. Складність використання акустичної потужності для переходу до параметрів пульсацій бульбашок полягає в тому, що вона витрачається не тільки на утворення пульсації бульбашок, але і на випромінювання звуку, звукохімічні реакції і акустичні течії, при цьому визначити частку потужності, що припадає на кавітацію, важко.

Вимірювання електричної потужності. Електрична потужність, споживана електроакустичним перетворювачем, використовується в багатьох ультразвукових установках як для підстроювання в резонанс коливальної системи, так і для регулювання потужності кавітаційного впливу.

Електрична потужність $P_{\text{ел}}$ пов'язана з акустичною потужністю P_a співвідношенням [77]:

$$P_a = \eta_{\text{эм}} \eta_{\text{ма}} P_{\text{ел}}, \quad (2.38)$$

де η – електромеханічний і механічний ККД, що залежать від параметрів електроакустичного перетворювача, випромінювача і середовища.

З огляду на складну опосередковану залежність електричної потужності від акустичної потужності і складність визначення параметрів пульсацій бульбашок по акустичній потужності, використання електричної потужності перетворювача має сенс тільки в якості деякого критерію для зіставлення результатів, отриманих на одній і тій же установці.

Вимірювання швидкості розповсюдження пружних хвиль в акустичному середовищі. Швидкість розповсюдження пружних хвиль c_K в акустичному середовищі визначається відомою із акустики залежністю [126]:

$$c_0 = \sqrt{E/\rho}, \quad (2.39)$$

де E – модуль пружності середовища, що має щільність ρ .

Наведена залежність (2.39) засвідчує, що за фізичним змістом вона визначає співвідношення пружних (E) і масових (ρ) характеристик середовища. Якщо залежність (2.39) здебільшого використовується для пружних середовищ, то для рідин, що насичені газом, застосовується формула [196]:

$$c_K = 1/\sqrt{\rho\beta_{ac}}, \quad (2.40)$$

де β_{ac} – адіабатична стискуваність.

Порівнюючи (1) і (2) можна зазначити, що параметри E і β_{ac} між собою співвідносяться як $\beta_{ac} = 1/E$.

Існує низка методів визначення швидкості розповсюдження звукових хвиль у середовищах [126, 136, 172].

Фазовий метод. Цей метод використовується для високоточних вимірювань в режимі біжучої хвилі. Суть методу полягає у порівнянні фаз двох сигналів – які пройшли від контактної зони кавітатора через досліджуване середовище до жорсткої границі. Порівняння фаз здійснюється або в акустичному (на перетворювачі) або електричному (у вимірювальному приймачі) трактах. Для реєстрації різниці фаз застосовуються відповідні прилади та датчики. Фаза плоскої хвилі, що розповсюджується в напрямку осі x , має вигляд:

$$\varphi(x, t) = \omega t - kx + \varphi_0. \quad (2.41)$$

Фаза хвилі на джерелі (при $x = 0$) дорівнює:

$$\varphi(0, t) = \omega t + \varphi_0. \quad (2.42)$$

Як видно, різниця фаз між сигналами джерела і приймача не залежить від часу і є досить простою функцією відстані і частоти:

$$\Phi(x, f) = \varphi(0, t) - \varphi(x, t) = kx = (2\pi/c)fx. \quad (2.43)$$

Із (2.43) видно, що різниця фаз Φ лінійно залежить і від відстані x , і від частоти f , причому швидкість росту фази обернено пропорційна швидкості хвилі c . Звідси випливають дві можливості знаходження швидкості:

– за умов фіксованій відомій частоті вимірюється залежність зсуву фаз Φ від відстані x і з нахилу прямої ($\partial\Phi/\partial x = 2\pi f/c$) знаходять швидкість c ;

– за умов відомої відстані x між джерелом і приймачем вимірюється залежність зсуву фаз Φ від частоти f та з нахилу прямої розраховують швидкість c . Для вимірювання різниці фаз між двома синусоїдальними коливаннями набув використання спосіб, заснований на аналізі зображень сигналів на екрані осцилографа [184]. Гармонійні сигнали (рис. 2.17) мають різну амплітуду, а точки однакової фази вказаних функцій відрізняються лише зсувом в часі Δt .

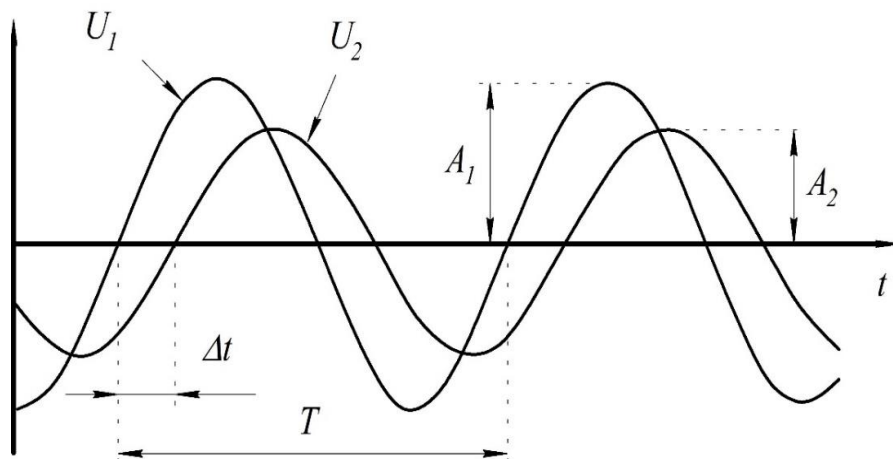


Рисунок 2.17 – Переміщення двох гармонійних сигналів у часі

У часі ці сигнали змінюються за гармонійним законом:

$$\begin{aligned} U_1 &= A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \\ U_2 &= A_2 \cos(\omega t + \varphi_2). \end{aligned} \quad (2.44)$$

Якщо вираз (2.44) для другого сигналу записати у вигляді $U_2 = A_2 \cos[\omega(t - \Delta t) + \varphi_1]$, то в порівнянні з виразом можна зробити висновок, що фазовий зсув безпосередньо пов'язаний з тимчасовим

зрушенням: $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \omega\Delta t$. Враховуючи, що період хвилі складає $T = 2\pi/\omega$, фаза може бути знайдена графічним способом на осцилограмі:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta t}{T}. \quad (2.45)$$

Метод вимірювання зсуву фаз стає особливо простим [170], якщо при проведенні вимірювань величина $\Delta\varphi$ змінюється в широкому діапазоні і досить фіксувати зміну $\Delta\varphi$ на ціле число π .

Інший графічний спосіб, заснований на порівнянні двох сигналів шляхом розгляду замкнутої траєкторії (за умови $X = U_1(t)$ та $Y = U_2(t)$) (рис. 2.18). Вид фігур залежить від відношення між частотами, фазами та амплітудами сигналів. В найпростішому випадку при однаковій частоті – еліпс (див. рис. 2.18). За характерними точками знаходять амплітуду коливань і зсув фаз між ними [151, 280]:

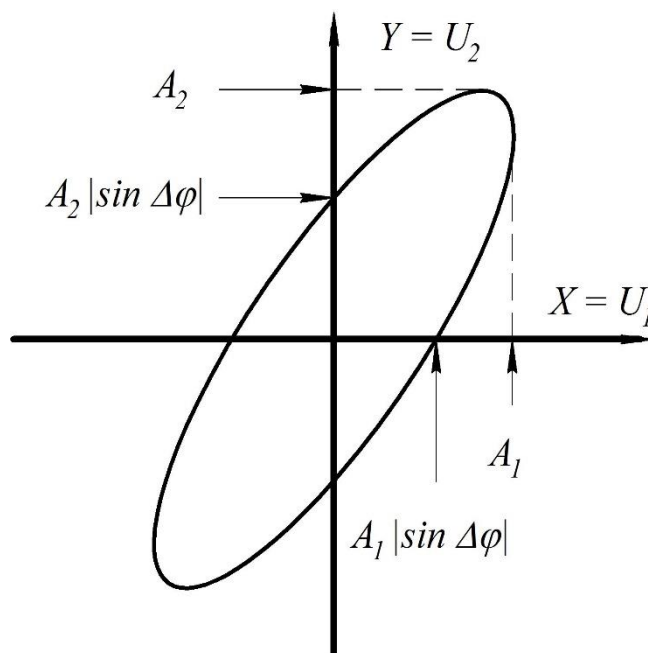


Рисунок 2.18 – Фігура Ліссажу

Вимірювання швидкості звуку згідно методу фігур Ліссажу здійснюється шляхом використання переміщення приймача за фіксованої частоти хвилі. Якщо при переміщенні приймача з однієї точки в іншу еліпс

здійснює N оборотів, то, згідно з формулою (2.46) величина просторового зсуву приймача Δx пов'язана з N наступним чином:

$$\Delta x = cN/f. \quad (2.46)$$

Таким чином, якщо змінювати відстань між джерелом і приймачем і реєструвати відповідні зрушення Δx в точках повного обороту фігури Ліссажу, то з кута нахилу лінійної залежності $\Delta x(N)$ можна визначити швидкість звуку.

Якщо змінюється частота при фіксованій відстані, то використовують залежність (2.47), що зв'язує число повних обертів фігури Ліссажу з частотою:

$$f = cN/x. \quad (2.47)$$

В експерименті реєструються значення частот, при досягненні яких фігура Ліссажу робить ціле число повних обертів. З нахилу лінійної залежності $f(N)$ з урахуванням відомої відстані x між джерелом і приймачем знаходять швидкість звуку.

На практиці можуть виникнути деякі труднощі, пов'язані з виникненням частотно-залежного фазового зсуву, як наслідок резонансного характеру електроакустичного перетворення в п'єзопластині між електричними і акустичними сигналами. Тому для підвищення точності вимірювань варто працювати в діапазоні частот, не дуже близьких до резонансних частот джерела і приймача. Цей недолік зменшує ефективність застосування методу фігур Ліссажу для вимірювання швидкості звуку в кавітаційних процесах.

2.6 Оцінка та обґрунтування вибору методів дослідження процесів та параметрів акустичної обробки технологічних середовищ

На основі огляду та аналізу розглянутих методів вимірювання швидкості розповсюдження акустичних хвиль можна зазначити наступне.

Інтерферометричному методу притаманні такі переваги: можливість вимірювання малих переміщень і наявність практично необмеженого частотного діапазону. До недоліків методу можна віднести: неоднозначність відліку; малий динамічний діапазон вимірюваних переміщень; необхідність

встановлювати випромінювач близько до поверхні об'єкта для створення інтерференційної картини; залежність значень від відстані між випромінювачем і відбивачем від коефіцієнта відбиття і форми відбивача, що пов'язано зі згасанням і розсіюванням звуку.

Локаційні методи мають наступні переваги перед інтерферометричним методом: значно ширший динамічний діапазон; незалежність точності вимірювання від відстані між випромінювачем і об'єктом; можливість віддалення випромінювача від об'єкта на значну відстань.

Переваги методу перекриття луна – імпульсів полягають в тому, що він представляє собою універсальний і достовірний спосіб точного вимірювання швидкості в твердих і рідких сумішах, розчинах. Головним недоліком є складність інтерпретації картини луни в разі сильного розсіювання матеріалів і в тонких зразках. До того ж, правильне перекривання луни досить складно здійснити, так само як і накладення імпульсів в методі перекриття луна-імпульсів [50].

Серед локаційних методів імпульсний і амплітудно-фазовий методи мають найгірші показники. Окрім зазначених вище недоліків, вони вимагають розширеної смуги частот приймально-випромінюючих елементів і підсилювального тракту, що знижує захищеність і вибірковість. Частотний і фазовий методи мають найбільш вузьку смугу частот прийому випромінюючого тракту, що забезпечує найбільш достовірні енергетичні співвідношення випроміненого і прийнятого сигналів та високу перешкодозахищеність. Саме фазовий метод ефективно використовувати для високоточних вимірювань в режимі біжучої хвилі. Для реєстрації різниці фаз застосовуються відповідні прибори та датчики [35]. Порівняння фаз здійснюється або в акустичному (на перетворювачі) або електричному (у вимірювальному приймачі) трактах. Цей метод і пропонується використати для визначення швидкості розповсюдження хвиль в різних за реологічними властивостями технологічних середовищах.

Для дослідження взаємодії технологічних середовищ та їхнього впливу на акустичний апарат застосовується аналітично-експериментальний метод, що оснований на використанні аналітичних залежностей (2.18), (2.19) та (2.39). Із експериментів знаходиться швидкість розповсюдження хвиль.

2.7 Висновки по розділу

1. Встановлено, що питання класифікації технологічних середовищ за своїм значенням реологічних властивостей та акустичних параметрів стоїть на одному з перших місць, оскільки воно визначає характеристики об'єкта та предмета дослідження.

2. Методикою проведеного аналізу виявлено, що множинне перетворення енергії ультразвукових коливань при обробці технологічних середовищ потребує системного підходу при встановленні оптимальних режимів. Сутність підходу полягає у обґрунтуванні фактичних меж стадій із урахуванням зміни параметрів на всьому етапі протікання кавітаційного процесу.

3. Необхідні додаткові дослідження по встановленню залежності амплітуди звукового тиску від акустичних параметрів кавітатора та реологічних властивостей оброблювального середовища. Ці залежності дозволять більш точно описати робочий процес взаємодії кавітатора та оброблювального середовища.

4. Встановлено, що опис протікання кавітаційного процесу має базуватися на представленні системи «кавітатор – оброблювальне середовище» як єдиної системи, що враховує в спільному русі пружно-інерційні та дисипативні властивості кожної із підсистем.

5. Здійснена оцінка методів вимірювання акустичних хвиль при кавітаційній обробці робочих середовищ засвідчила велику низку способів дослідження та значну розбіжність в числових значеннях параметрів акустичної обробки. Так, наприклад, швидкість розповсюдження хвиль в

технологічних середовищах коливається в межах від $2,0 \text{ м/с}$ до 740 м/с на стадіях розвиненої кавітації.

6. Суттєва відмінність в акустичних параметрах рідин і газів, що підтверджена характером і числовими значеннями різкої зміни хвильового опору (див. рис. 2.16), засвідчує, що виникає нова проблема вивчення змін акустичних параметрів середовища у часі і в конкретних умовах розвитку кавітаційного процесу з очевидною необхідністю врахування цих змін при визначенні як режиму так і параметрів протікання технологічного процесу.

7. Розроблений алгоритм для побудови моделі здійснення досліджень передбачає поетапне застосування системного аналізу та синтезу. Визначені структурно-механічні та реологічні властивості технологічного середовища мають складати структурну модель. Наступні три етапи алгоритму визначають розподіл зон і областей розвиненої кавітації з урахуванням зміни фізичних властивостей оброблюваного дисперсного середовища.

8. Важливим параметром визначення ефективності протікання кавітаційного процесу є встановлення та оцінка коефіцієнта поглинання енергії. Саме цей параметр має бути досліджений та визначений для різних за структурою та властивостями технологічних середовищ із встановленням законів його зміни.

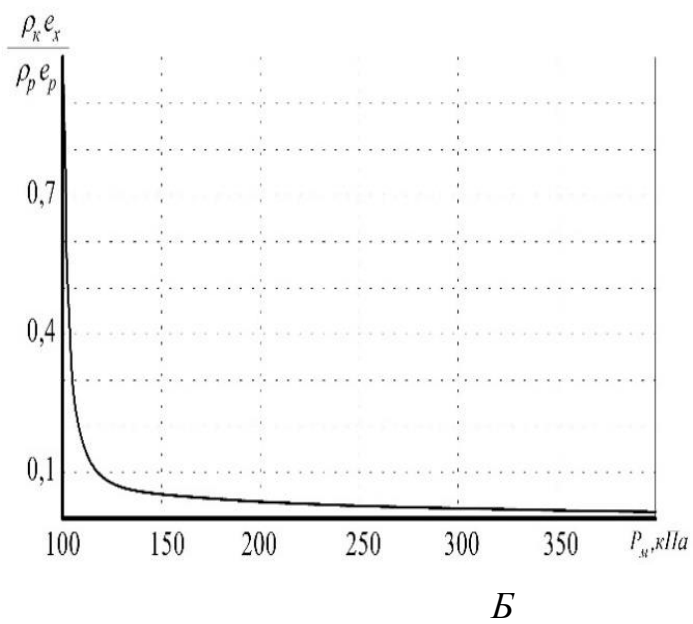
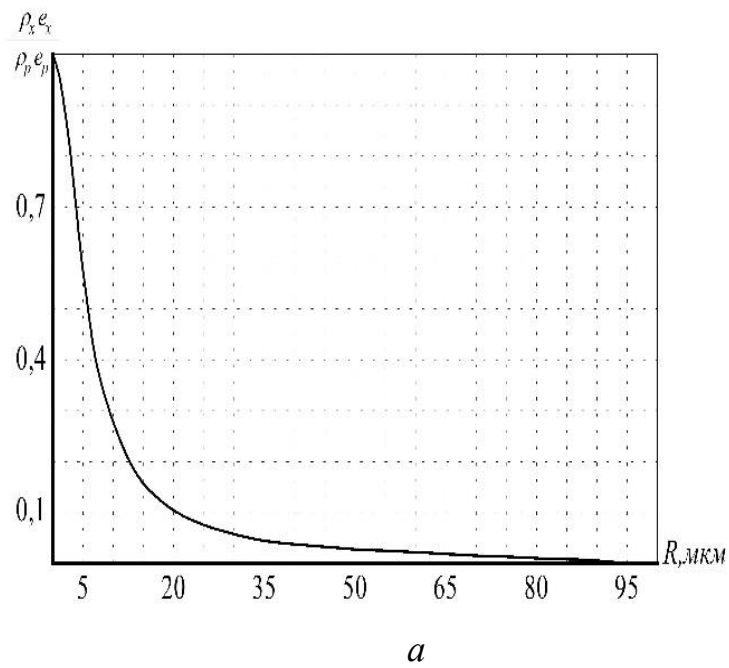
9. Отримані результати, за визначеною методологією та обґрунтованими в даному розділі методиками досліджень, являються основою розробки нових і вдосконалених існуючих режимів та параметрів, які відповідають сучасним вимогам значної інтенсифікації протікання кавітаційних процесів обробки конкретних технологічних середовищ.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ НА УТВОРЕННЯ І РОЗВИТОК КАВІТАЦІЙНОЇ ОБЛАСТІ

3.1 Передумови та припущення

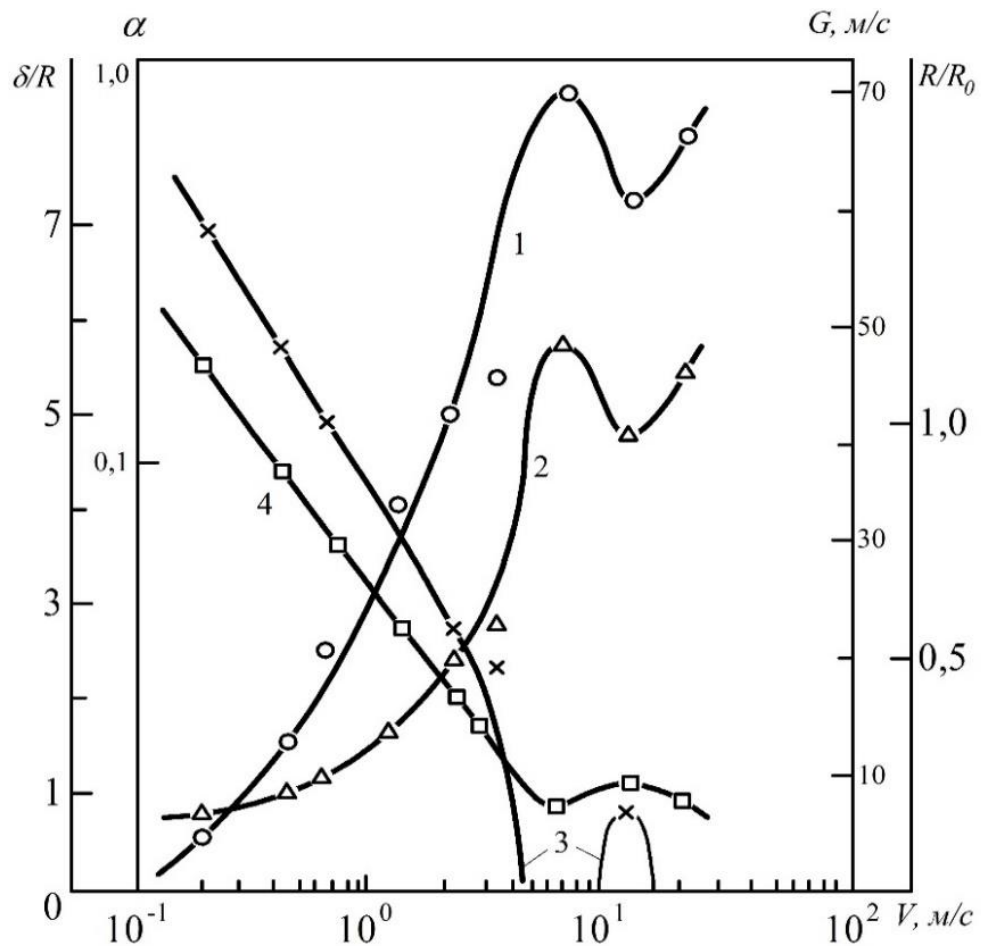
Знання зміни реологічних властивостей є основою для обґрунтування і вибору фізичних та математичних моделей технологічних середовищ в умовах їхньої обробки методом акустичної кавітації (див. розд. 2). Саме в цьому контексті виконані раніше дослідження [72, 73, 83–85], не дають повної відповіді на отримання достовірної інформації про зміну реологічних властивостей технологічних середовищ, якими є в'язкість, пластичність, пружність. В значній мірі це відноситься до визначення дисипативних складових, домінуючим параметром яких є в'язкість. Важливість знання в'язкості обумовлено іще і тим, що більшість робіт, що проаналізовані в роботі [73] пропонують резонансні режими, які за кількісними характеристиками процесу повністю залежать від числових значень коефіцієнтів в'язкості. Проблемним питанням є також відсутність загальноприйнятого твердження стосовно визначення числових значень інтенсивності в залежності від в'язкості технологічного середовища. А як відомо [73], інтенсивність є ключовою характеристикою, за якою визначаються необхідні параметри кавітаційного апарату. Певною мірою це стосується і хвильового опору технологічного середовища, який визначається добутком щільності середовища ρ_c на швидкість розповсюдження хвиль c_c в ньому. Підтвердженням суттєвої зміни співвідношення хвильового опору в процесі кавітаційної дії на технологічне середовище є графіки (рис. 3.1), що приведені в цілому ряду робіт [72, 85, 126].



a – від радіусу бульбашки; b – від звукового тиску

Рисунок 3.1 – Залежність зміни хвильового опору

На можливість зміни параметрів на стадіях утворення кавітації та її розвитку зазначається і в роботі [260] (рис. 3.2).



1 – індекс кавітації; 2 – відносний розмір газових бульбашок R / R_0 в кавітаційній області; 3 – фазова швидкість звуку c в кавітаційній області;
4 – відносна ширина фронту ударної хвилі δ / R

Рисунок 3.2 – Зміна параметрів кавітаційного процесу

В момент виникнення кавітації (див. рис. 3.2, крива 4) швидкість звуку в середовищі близько випромінювача виявляється в 30 разів менше швидкості звуку в рідині і продовжує падати зі збільшенням інтенсивності випромінювання. В таких умовах початок акустичної кавітації (поріг кавітації) можна визначити як утворення гідродинамічної нелінійності середовища, що виражається в переході від малих пульсацій газових бульбашок до пульсацій із сплескуванням, а розвинену кавітацію – як процес періодичного поширення гідродинамічного розриву в вигляді фронту хвилі сплескування газових

бульбашок [260]. При значенні V біля 4 м/с відбувається перехід до надзвукових рухів акустичного випромінювача. Саме це явище названо в роботі [260] другим порогом акустичної кавітації. Приблизно в цій же області значень V ширина фронту хвилі δ стає менше діаметру газової бульбашки. При цьому, бульбашка настільки швидко потрапляє із зони зниженого тиску в зону підвищеного тиску, що не встигає захлопнутись. Відбувається руйнування фронту хвилі і виникають розриви на хімічному, диспергуючому і інших технологічних процесах кавітації, що виявлені експериментально в [261].

При подальшому збільшенні V розмір газових бульбашок в суспензії наближається до резонансного і збудження прогресивної хвилі стиснення стає неможливим. Графічно це відбивається в тому, що фазова швидкість звуку c спрямовується до нуля. В цей же момент суспензія має найбільший газовміст ($\alpha \rightarrow 1$) і найбільший розмір газових бульбашок. При значеннях V біля 9 м/с швидкість звуку стає відмінною від нуля і знову формується фронт хвилі сплескування бульбашок. Можна погоджуватися чи ставити деякі пояснення під сумнів. Так, наприклад, яким чином отримували швидкість кавітатора V в значеннях біля 4 м/с чи значеннях V біля 9 м/с , що є причиною різкого зменшення, а потім збільшення індексу кавітації α та відносного розміру газових бульбашок R / R_0 в кавітаційній області.

В тому чи іншому тлумаченні процесу зародження бульбашок, їх розвитку, сплескування або відсутність сплескування відзначається і в цілій низці інших робіт [72, 83, 84, 132, 241–247]. Очевидно, сутність процесу достеменно може бути з'ясована у виявленні ступені впливу зміни саме окремих реологічних властивостей технологічних середовищ (в'язкість, пластичність, пружність) на процес кавітації. Тоді відкриється можливість запропонувати вдосконалені та знайти нові режими та параметри, які значно інтенсифікують процес акустичної обробки технологічних середовищ.

3.2 Дослідження ступені впливу в'язко-пластичних та пружних властивостей технологічного середовища на параметри кавітаційного процесу

3.2.1 Аналітичні залежності визначення в'язкості за різних гіпотез зміни їхніх властивостей

Дослідженню впливу в'язкості на процес утворення і сплескування кавітаційної бульбашки присвячено ряд робіт, в яких цей вплив враховувався в рівнянні її руху (див. розд. 1).

Вплив в'язкості рідини на стабілізацію сферичної форми бульбашки полягає в дисипації енергії вищих гармонік коливань, однак кількісні оцінки цих ефектів представляють значні труднощі [23, 73, 83–87]. В'язкість також впливає на інтенсивність колапсу, особливо на останніх стадіях стиснення бульбашки [84, 165, 274]. Це завдання до вакуумної порожнини (завдання Релея) розглядалася в роботах [123, 149, 253, 254]. Критерієм переходу від стиснення з нескінченно зростаючою швидкістю до стиснення за нескінченний час являється число Рейнольдса, Re [101, 105, 161]:

$$Re = \frac{R_0}{\mu} \sqrt{\frac{p_0}{\rho}},$$

де R_0 – радіус бульбашки; p_0 – тиск;

За умови, що середовище володіє великою в'язкістю ($Re < Re^*$, де Re^* – деяке критичне число), відбувається дуже повільний у часі процес сплескування бульбашки. Якщо середовище має малу в'язкість, тобто $Re > Re^*$, то швидкість бульбашки необмежено зростає і при $R \rightarrow 0$ процес відбувається відповідно до закону Релея $\dot{R} \propto R^{-3/2}$ [83], але за меншого значення коефіцієнту пропорційності, внаслідок того, що частина енергії перетворюється в тепло за рахунок дисипації [168, 255]. У проміжному випадку при $Re = Re^*$ бульбашка закривається за кінцевий час. За умови, що $R_0 < R^*$ кумуляція енергії повністю усувається в'язкістю.

У роботі [274] виявлено ще один ефект впливу в'язкості на динаміку руху бульбашки. Зазначається, що бульбашка у в'язкій рідині здійснює хаотичні переміщення в просторі в межах міліметра від точки фокуса ультразвукової хвилі. В'язкість призводить до того, що локальні течії, викликані переміщенням бульбашки поступово згасають. Але відбувається це не миттєво, а значить, ці переміщення можуть впливати і на майбутній рух бульбашки. В результаті сила, що діє на бульбашку, залежить не тільки від параметрів руху в даний момент часу, але і від передісторії, від того, як рухалася бульбашка деякий час тому. Наведена інформація засвідчує наявність суттєвого впливу в'язкості і ця обставина має враховуватися у вдосконаленні режимів та параметрів протікання процесу акустичної обробки.

Врахування пружно-в'язких властивостей в процесі їх обробки застосовувалася, як, правило, гіпотеза в'язкого тертя, що отримала назву «частотозалежна модель». За цією гіпотезою, врахування зміни в'язкості, найбільш розповсюдженою є модель Кельвіна-Фойгта [117], в якій залежність між напруженням σ і деформацією ε має вигляд:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}, \quad (3.1)$$

де η – коефіцієнт, що враховує в'язкі властивості; E – модуль пружності; $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформації.

Залежність (3.1) відрізняється від звичайного пружного тіла, застосованого раніше [59] закону Гука у вигляді $\sigma = E\varepsilon$, врахуванням дисипативної складової, яка є функцією швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$.

Хвильове рівняння пружно-в'язкого середовища (3.1) має вигляд [27]:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^3 x}{\partial x^2 \partial t}. \quad (3.2)$$

Рішенням рівняння (3.2) є функція :

$$x = A_0 e^{\pm \alpha z + i(\pm kz - \omega t)}, \quad (3.3)$$

де x – переміщення шару оброблювального середовища з амплітудою коливань A_0 ; α – коефіцієнт згасання хвилі в середовищі, яке знаходиться під дією

акустичного апарату; κ – хвильове число ($\kappa = \omega / c$); z – координата за напрямком якої розповсюджується хвиля.

Найважливішими характеристиками рівняння (3.2) та його рішення (3.4) являються модуль E пружності середовища в конкретній стадії його обробки та коефіцієнт опору η , який і визначає в'язку властивість технологічного середовища. Підстановкою рішення (3.3) в (3.2) із врахуванням (3.1) після нескладних перетворень отримаємо вираз для визначення коефіцієнту опору:

$$\eta = 2E \frac{\alpha}{c(k^2 - \alpha^2)}. \quad (3.4)$$

На величину коефіцієнта опору η має вплив коефіцієнт згасання хвилі α в середовищі, яке знаходиться під дією акустичного апарату, хвильове число κ ($\kappa = \omega / c$) та модуль пружності середовища E , який визначається за залежністю:

$$E = \frac{\rho \omega^2 (k^2 - \alpha^2)}{\sqrt{(k^4 - \alpha^4)^2 + 4k^2 \alpha^2 (\alpha^2 + k^2)^2}}. \quad (3.5)$$

Існує і інша гіпотеза [27], за якою дисипативна складова є функцією амплітуди переміщення. Залежність між напруженням і деформацією на відміну від (3.1) представляється у дещо іншому вигляді:

$$\sigma = E\varepsilon + iE\varepsilon\gamma, \quad (3.6)$$

де i – мніма одиниця, яка вказує на поворот вектора дисипативної складової сили $E\varepsilon\gamma$ відносно пружної $E\varepsilon$ на кут $\pi/2$; γ – коефіцієнт опору, який оцінює рівень енергії, що розсіюється в середовищі за один цикл коливань.

Тобто коефіцієнт опору є функцією амплітуди деформації, а дисипативна сила, як і в рівнянні (3.2), за напрямком направлена в сторону, протилежну направленню швидкості. Визначення коефіцієнта γ та його фізична сутність наведено нижче (див. метод петлі гістерезису).

Хвильове рівняння, складене у відповідності до залежності (3.6), має вигляд:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = c^2 (1 + i\gamma) \frac{d^2 x}{dz^2} \quad (3.7)$$

Рішення рівняння визначається комплексною хвильовою функцією (3.7):

$$x(z_1 t) = X_0 e^{i(\omega t - k^* x)}, \quad (3.8)$$

де k^* – комплексне хвильове число:

$$k^* = \omega / c (\alpha + i\beta). \quad (3.9)$$

Коефіцієнти α і β отримані в результаті підстановки (3.8) у (3.7) після нескладних перетворень і мають наступний вигляд:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}-1}{2(1+\gamma^2)}}; \quad \beta = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}+1}{2(1+\gamma^2)}} \quad (3.10)$$

Коефіцієнт α визначає коефіцієнт згасання хвилі, а β впливає на довжину тієї ж хвилі. Дійсно, якщо розсіяння енергії не враховувати ($\gamma = 0$), то, як слідує із (3.10) $\alpha = 0$, а $\beta = 1$. Це свідчить, що хвиля в середовищі розповсюджується без згасання і тоді на відміну (3.9), хвильове число k має вигляд: $k = \omega/c$, що відповідає моделі абсолютно пружного тіла.

Швидкість розповсюдження хвиль c , що входить в рівняння (3.7), на відмінну від пружного середовища, в якому $c = E/\rho$, має вигляд:

$$c^2 = \frac{E^*}{\rho} = \left(\frac{\omega}{k^*} \right)^2 = \frac{\omega^2}{(\kappa - i\alpha)^2}, \quad (3.11)$$

де $E^* = E' + iE''$ – комплексний модуль пружності середовища; E', E'' – дійсна і мніма частина комплексного модуля пружності; ρ – густина середовища; α – коефіцієнт згасання хвилі.

Рівняння (3.7) можна вирішити відносно хвильового числа ω/c і коефіцієнта поглинання α , або відносно дійсної E' і мнімої частини E'' комплексного модуля пружності.

Відносно хвильового числа ω/c і коефіцієнта поглинання α отримаємо:

$$\omega/c = \sqrt{\frac{(\varphi-1)\rho\omega^2}{2\varphi^2 E'}}; \quad \alpha = \sqrt{\frac{(\varphi+1)\rho\omega^2}{2\varphi^2 E'}}; \quad \left(\varphi = E''/E' \right). \quad (3.12)$$

Відносно дійсної E' і мнімої частини E'' комплексного модуля пружності:

$$E' = \frac{(1 - \alpha^2 c^2 / \omega^2) \rho c^2}{(1 + \alpha^2 c^2 / \omega^2)^2}; E'' = \frac{2 \rho c^2 \alpha c / \omega}{[1 + (\alpha c / \omega)^2]^2}. \quad (3.13)$$

Важливість отриманих формул полягає у можливості визначити числові значення коефіцієнта поглинання α . Для цього необхідно мати значення швидкості c розповсюдження хвиль, числове значення щільності середовища ρ в конкретний момент протікання тої чи іншої стадії кавітаційної обробки середовища та комплексний модуль пружності. Цікавим результатом для аналізу комплексних модулів пружності (3.13) є умова: $(\alpha^2 c^2 / \omega^2 \ll 1)$ за якою в середовищі можливий випадок малого впливу величини згасання на розповсюдження хвиль в середовищі. Тоді вираз (3.13) буде мати вигляд:

$$E' = \rho c^2; E'' = 2 \rho c^2 \alpha c / \omega.$$

Для визначення коефіцієнта поглинання із врахуванням коефіцієнтів: в'язкості зсуву та об'ємної в'язкості, теплопровідності, питомої теплоємності газу при постійному об'єму та постійному тиску може бути використана наступна залежність [88]:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2 \rho c_{xв}^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \eta' + \chi \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (3.14)$$

де ω – частота, $c_{xв}$ – швидкість розповсюдження хвилі; η, η' – коефіцієнти в'язкості зсуву та об'ємної в'язкості; χ – коефіцієнт теплопровідності; c_v, c_p – питома теплоємність газу при постійному об'єму та постійному тиску, відповідно.

Незалежно від зміни напруження зсуву від градієнта швидкості для визначення коефіцієнта поглинання можна використати рівняння [101]:

$$\Delta p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\rho \frac{\partial^2 \Delta v}{\partial t^2}, \quad (3.15)$$

де p – миттєве значення тиску в середовищі; c_0 – швидкість звуку в середовищі; t – час; Δv – миттєвий об'ємний вміст бульбашок.

Рівняння (3.15) описує поширення акустичного поля в середовищі, що містить кавітаційні бульбашки, які заповнені парою або газом. Якщо враховувати, що коливання кавітаційних бульбашок носять нелінійний характер, виникає потреба врахувати вищі гармоніки. В такому випадку звуковий тиск і миттєвий об'ємний вміст бульбашок у відповідності до положень математичної фізики може бути представлено у вигляді рядів Фур'є в комплексному вигляді []:

$$\bar{p}(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{p}_n(r) e^{-in\omega t}; \quad \bar{v}(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{v}_n(r) e^{-in\omega t}, \quad (3.16)$$

де i – мнима одиниця, n – номер гармоніки; ω – колова частота коливань акустичного апарату, яка передається в технологічне середовище; r – радіус-вектор точки середовища.

Після підстановки (3.16) в хвильове рівняння (3.15) отримаємо рівняння для будь-якої гармоніки:

$$\Delta \bar{p}_n + \frac{n^2 \omega^2}{c_0^2} \bar{p}_n = n^2 \omega^2 p_0 \bar{v}_n. \quad (3.17)$$

Для основної гармоніки рівняння (3.17) має вигляд:

$$\Delta \bar{p}_1 + \frac{\omega^2}{c_0^2} \left(1 - \frac{p_0 c_0^2 \bar{v}_1}{\bar{p}_1} \right) \bar{p}_1 = 0. \quad (3.18)$$

Рівняння (3.18) після відповідних позначень дійсної і мнимої частин через хвильове число кавітуючого середовища та коефіцієнт поглинання в кавітуючому середовищі буде виглядати в більш компактному вигляді:

$$\Delta \bar{p}_1 + (K + i\alpha_*)^2 \bar{p}_1 = 0, \quad (3.19)$$

де K – хвильове число кавітуючого середовища, α_* – коефіцієнт поглинання в кавітуючому середовищі.

Таким чином, із рівнянь (3.18) і (3.19) отримаємо коефіцієнт поглинання:

$$\alpha_* = -\frac{\omega}{c_0} \operatorname{Im} \frac{\rho_0 c_0^2 \bar{v}_1}{\bar{p}_1}. \quad (3.20)$$

Отже, коефіцієнт поглинання (3.20) залежить від колової частоти коливань акустичного апарату, швидкості розповсюдження хвиль в середовищі, звукового тиску в кавітуючому середовищі і об'ємного вмісту

кавітаційних бульбашок. Враховуючи залежність для інтенсивності $I = p^2/2\rho c$ співвідношення (3.20) можна представити у вигляді:

$$a_* = -\frac{\omega}{c_0} \operatorname{Im} \frac{\rho_0 c_0^2 \bar{v}_1}{(\sqrt{2\rho c I}) e^{i\varphi}}; I = \frac{|\bar{p}_1|^2}{2\rho c}; \bar{p}_1 = |\bar{p}_1| e^{i\varphi}, \quad (3.21)$$

де φ – фазовий зсув між дійсною і мнімою частинами ультразвукового тиску \bar{p}_1 .

В середовищі, в якому поширюється ультразвук, змінюються тиск і температура у середовищі, що збурює його динамічну рівновагу. Процес встановлення рівноваги супроводжується дисипацією енергії хвилі, тобто поглинанням звуку. Переважна частина поглиненої енергії перетворюється в тепло, менша частина викликає в середовищі незворотні структурні зміни. Поглинання енергії є результатом тертя часток один про одного. Цей процес обумовлений внутрішнім тертям, теплопровідністю поглинаючого середовища і її структурою. В різних за властивостями середовищах поглинання енергії різне. Також поглинання енергії залежить і від параметрів ультразвукових коливань. Аналіз, отриманих вище залежностей (3.20 та 3.21) засвідчує про зв'язок інтенсивності I питомої енергії P_{num} та коефіцієнта поглинання енергії a :

$$a = P_{num}/I. \quad (3.22)$$

Отже коефіцієнт поглинання a , як це засвідчує залежність (3.22), не тільки характеризує зміну питомої енергії P_{num} та інтенсивності ультразвуку I в опромінюваному середовищі, а і може слугувати критерієм оцінки ефективності протікання процесу акустичної обробки цього середовища. Інтенсивність ультразвукових коливань в середовищі зменшується за експоненціальним законом:

$$I = I_0 e^{-2\Delta V n h}, \quad (3.23)$$

де I, I_0 – інтенсивності ультразвукової хвилі в поверхні і на глибині h ; δn – коефіцієнт поглинання, який залежить від частоти ультразвукової хвилі, температури і властивостей середовища.

Коефіцієнт поглинання δn – величина, зворотна тій відстані, на якій амплітуда звукової хвилі спадає в e разів. Чим більше δn , тим сильніше середовище поглинає ультразвукову хвилю. Коефіцієнт поглинання δn зростає при збільшенні частоти ультразвуку (рис. 3.3).

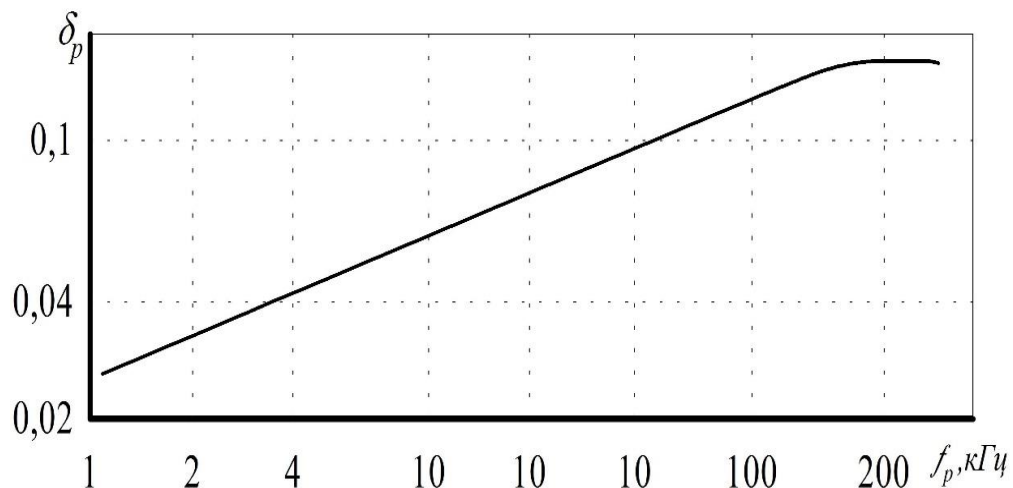


Рисунок 3.3 – Зміна коефіцієнта поглинання із збільшенням частоти ультразвуку

Згідно з класичним уявленням про поширення ультразвуку в рідинах лежить припущення [8, 9], що при поширенні хвилі в рідині виникають релаксаційні процеси, що потребують деякого часу для відновлення певного стану [56]. Наявність цих процесів приводить до додаткових втрат енергії понад втрат, викликаних в'язкістю і теплопровідністю, що і було зазначено вище. Це додаткове загасання різко зростає, коли час релаксації співпадає з періодом ультразвукових коливань.

В процесах обробки технологічних середовищ ультразвуковими коливаннями кавітаційні релаксаційні процеси в явному виді не враховуються [99], хоча опосередковано це явище є присутнім. Так, при визначенні кількості бульбашок, які не встигають захлопуватися, відмічається про наявність довго живучих бульбашок. Очевидно, що явище релаксації при протіканні процесів обробки технологічних середовищ ультразвуковими коливаннями потребують

більш глибокого аналізу та спеціальних досліджень. Адже відомо [56], що при дослідженні процесів релаксації реологічних середовищ за умови дії на них різного роду навантажень, в моделях їх стану виникає потреба враховувати коефіцієнти зсувної γ та об'ємної в'язкості γ' . Разом з тим, в реології [56] в деяких розрахунках коефіцієнт об'ємної в'язкості γ' приймають рівним нулю. У випадку лінійної зміни напруження зсуву від градієнта швидкості маємо ньютонівську рідину, за нелінійною зміною напруження зсуву від градієнта швидкості рідини [56]. Здійснені дослідження дають можливість зазначити наступне:

- знання коефіцієнта в'язкості технологічного середовища є необхідною умовою для визначення рівня енергії, що витрачається на складові процесу зародження та розвитку кавітації. При цьому в'язкість впливає на утворення, розвиток форм бульбашок, процесу їхнього сплескування;
- залежність коефіцієнта поглинання звуку від параметрів стану і частоти, несе повну інформацію про характерні для конкретного технологічного середовища процеси протікання акустичної обробки;
- отримані залежності (3.4), (3.5), (3.11), (3.13), (3.14), (3.20), (3.21) дозволяють визначити в'язкі властивості технологічного середовища, яке моделюється дискретними або розподіленими параметрами за частозалежним та частонезалежним законами зміни дисипативних характеристик технологічного середовища в процесі його акустичної обробки;
- із зазначених вище залежностей, зокрема і (3.22) видно, що визначене числове значення в'язких властивостей суттєво залежить і від швидкості розповсюдження хвиль в кавітуючому середовищі c_c .

3.2.2 Аналітичні залежності для визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітуючому середовищі

В даний час існують два основні методи вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі – інтерферометричний і імпульсний.

Інтерферометричний метод заснований на визначенні довжини ультразвукової хвилі при відомій частоті коливань. Імпульсний метод – на вимірі проміжку часу, протягом якого ультразвукова хвиля проходить відому відстань.

Для визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітуючому середовищі c_K зазвичай використовують формулу [126]:

$$c_K = \sqrt{E/\rho}. \quad (3.24)$$

Саме швидкість розповсюдження хвиль за фізичним змістом визначає співвідношення пружних (E) і інерційних (ρ) характеристик середовища, як оцінка певного впливу на процес його кавітації. Якщо залежність (3.24) здебільшого використовується для пружних середовищ, то для рідин, що насичені газом, використовується формула [196]:

$$c_K = 1/\sqrt{\rho\beta_{ac}}, \quad (3.25)$$

де β_{ac} – адіабатичне стискування.

За умови, що кавітаційне середовище складається із рідини з розподіленими в ній бульбашками газу і розглядається як однорідне двофазне середовище з середніми значеннями щільності, температури та тиску, швидкість розповсюдження хвиль можна визначити за формулою [113]:

$$c_K = \rho_2 c_p^2 / [\rho_p \varphi (1 - \varphi)], \quad (3.26)$$

де ρ_2 , ρ_p – відповідно густина газу і рідини; c_p – швидкість звуку в докавітаційній рідині; φ – відношення об'єму газової складової до об'єму газорідинної суміші (об'ємна частина газу в рідині).

Із формули (3.26) слідує, що числове значення швидкості c_K залежить від співвідношення газової і рідинної складових, як це і було зазначено вище.

Якщо утворення бульбашок в рідині реалізується внаслідок теплової дії, формула для визначення швидкості розповсюдження звуку має вид [113]:

$$c_K = P_m L \mu / [\rho_p R T (G_p T)^{1/2}], \quad (3.27)$$

де L – питома теплота фазового переходу; G_p – теплоємність рідини; R – універсальна газова постійна; μ – молярна маса речовини; T – температура, за якої здійснюється фазовий перехід.

В роботах [144, 145] не вказується чи є залежність зміни швидкості від частоти, тобто чи проявляється явище дисперсії. Про таку залежність зазначається в роботі [278], що виникнення кавітації призводить до появи в середовищі дисперсії фазової швидкості поширення хвиль. Така залежність має вигляд:

$$\omega_K / c_K = \omega / c_0 (1 + 4\pi n R_0 c_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega))^{1/2}, \quad (3.28)$$

де ω – частота хвилі; c_0 , c_K – швидкість звуку в рідині без кавітації і під дією кавітації; n – кількість бульбашок в одиниці об'єму рідини; R_0 – рівноважний радіус бульбашки; ω_0 – резонансна частота бульбашки; μ – коефіцієнт згасання коливань бульбашки.

Якщо концентрація бульбашок в рідині невелика, тобто $|4\pi n R_0 c_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega)| < 1$, вираз (3.28) спрощується і приводиться до вигляду:

$$\omega_K / c_K = \omega / c_0 (1 + 2\pi n R_0 c_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega)). \quad (3.29)$$

За умови, що область частот $\omega < \omega_0$ ($\mu < \omega_0$):

$$\omega_K / c_K = \omega / c_0 + ib\omega^2 + d\omega^3, \quad (3.30)$$

де

$$\left. \begin{aligned} c &= c_0 (1 + 2\pi n R_0 c_0^2 / \omega_0^2)^{-1}, \\ b &= 2\pi n R_0 c_0 \mu / \omega_0^4, \\ d &= 2\pi n R_0 c_0 / \omega_0^4. \end{aligned} \right\}$$

В результаті рішення стосовно переміщення [278] отримано графік зміни переміщення $u(x, \tau) / u_0$ від частоти π (рис. 3.4).

На відстанях від джерела кавітаційного апарату порядку $\sigma \sim 1$ починає впливати дисперсія, обумовлена наявністю бульбашок. Як видно з рис. 3.4,

виникають протягом позитивного напівперіоду «зародки», так званих, солітонів.

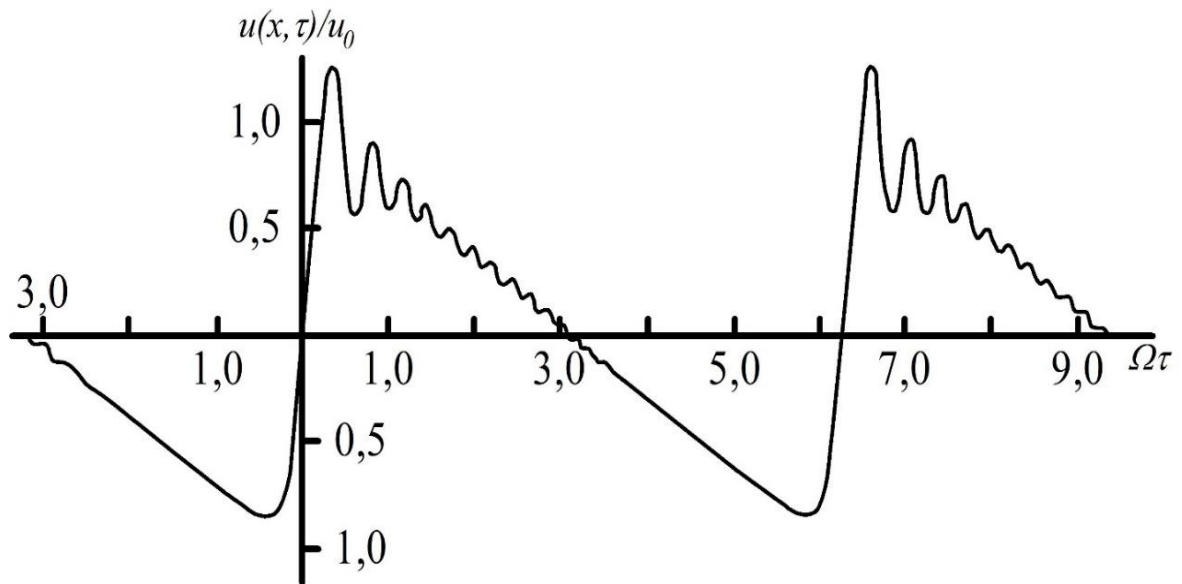


Рисунок 3.4 – Зміна переміщення в залежності від частоти

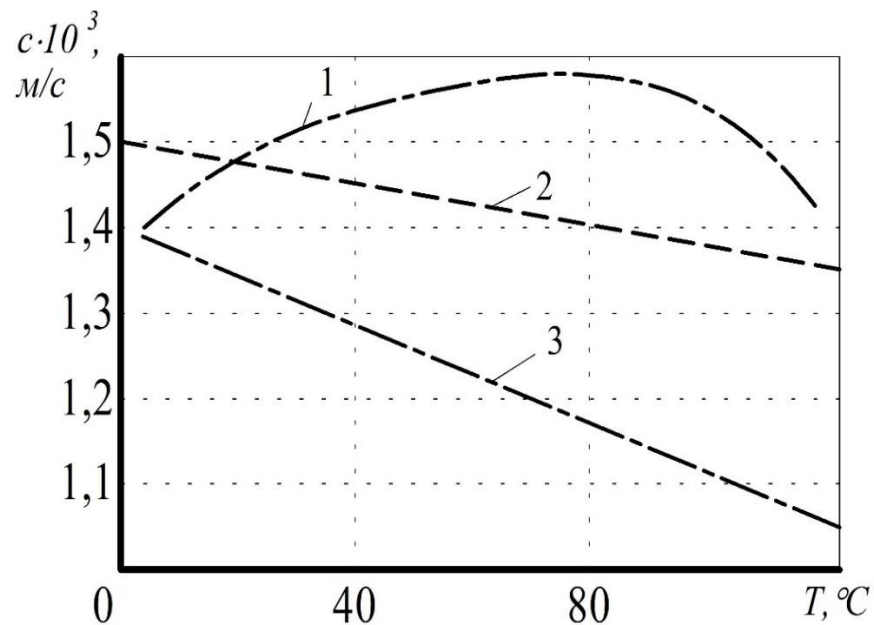
В роботі [260] пропонується формула для визначення швидкості у вигляді:

$$C^2 = \frac{R^2 C_a^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{R^2 (1-a)^2 (\omega_0^2 - \omega^2) + 3a(1-a) C_a^2}, \quad (3.31)$$

де C_{oe} – фазова швидкість звуку в крапельної рідини; $\omega_0 = [(3P_0 + 4\sigma / R) / R^2 \rho_a]^{0.5}$ – частота власних резонансних коливань газової бульбашки; σ – коефіцієнт поверхневого натягу; ρ_a – щільність крапельної рідини; p_0 – статичний тиск.

Застосування залежностей (3.29)– (3.31) в реальних умовах здійснення розрахунків викликає певні труднощі із необхідністю знань окрім швидкості звуку в рідині без кавітації і під дією кавітації, кількості бульбашок в одиниці об'єму рідини, рівноважного радіусу бульбашки, її резонансної частоти та номера гармоніки. В цитованій роботі [276] не наведено, яким чином визначається власна частота коливань бульбашки, оскільки до теперішнього

часу не з'ясовано чи в резонанс входить одна бульбашки, чи її певна кількість. Разом з тим, приведена інформація має бути в тому чи іншому вигляді врахованою. На відміну від газів, де швидкість звуку з підвищенням температури збільшується в наслідок того, що пружність газу, обумовлена переносом імпульсу збільшується, в рідинах швидкість звуку зменшується (на $2...6 \text{ м/(с}\cdot\text{град)}$) зі збільшенням температури (рис. 3.5).



1 – вода; 2 – ртуть; 3 – бензол

Рисунок 3.5 – Зміна швидкості ультразвуку в залежності від температури

Швидкість звуку (див. рис. 3.5) у воді зі збільшенням температури зростає з температурним коефіцієнтом $\partial c_0 / \partial T \approx 2,5 \text{ м/(с}\cdot\text{град)}$, досягає максимального значення $c = 1550 \text{ м/с}$ при $T = 67^\circ \text{C}$, а потім зменшується, як і в рідинах.

Із збільшенням статичного тиску швидкість розповсюдження звуку у воді лінійно збільшується на величину $0,1 \text{ м/(с}\cdot\text{атм)}$ [40]. Очевидно, що вибір залежності (3.23), (3.24), (3.25) чи (3.26) для визначення швидкості

розповсюдження хвиль в технологічних середовищах потребує конкретизації та умов оцінки протікання технологічного процесу. Обумовлено це тим, що, як було зазначено в першому розділі роботи (див. п. 1.2), в джерелах [144, 145] приводиться діапазон зміни швидкості в межах: 20...100 м/с, в роботі [219] $c_k = 25...30$ м/с, а в роботі [86] – в межах $c_k = 10...12$ м/с.

На основі виконаних результатів щодо існуючих аналітичних залежностей визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітуючому середовищі для застосування їх в подальших дослідженнях можна зробити такі висновки.

1. Існує необхідність проведення експериментальних досліджень для отримання якісної та кількісної картини зміни швидкості розповсюдження хвиль в залежності від фіксованого стану кавітуючого середовища.

2. Обумовлена ця необхідність різкими відмінностями в числових значеннях швидкості розповсюдження хвиль, що приведені в літературних джерелах. Можливим поясненням є або різні методики, або відсутність фіксації тої частини протікання кавітаційного процесу, в якому визначалася ця швидкість.

3. Достовірність отриманих результатів залежить від чіткого вибору методу експериментального дослідження в'язких і пружних характеристик та параметрів технологічного середовища.

3.2.3 Обґрунтування та вибір методу експериментального дослідження в'язких та пружних властивостей технологічного середовища

Серед відомих та найбільш поширених методів являються наступні [222, 266, 281]: метод петлі гістерезису, фазовий метод, енергетичний, спектрально-кореляційний аналіз, метод згасаючих коливань.

Метод петлі гістерезису. За цим методом площа петлі гістерезису в координатах «сила – переміщення» або в координатах «напруження –

деформація» характеризує розсіювання енергії в оброблювальному середовищі, а кут нахилу петлі – модуль його пружності [222]. Для виявлення особливостей методу динамічної петлі гістерезису розглянемо рух приведеної маси m оброблювального середовища в зоні контакту з акустичним апаратом. Диференціальне рівняння гістерезисного типу в напрямку протікання технологічного процесу x під дією сили кавітатора F має вигляд [222]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + R(x) = F. \quad (3.32)$$

Якщо виключити з диференціального рівняння (3.32) час t , то тоді отримаємо рівняння петлі гістерезису в координатах «сила F – переміщення x ». За умови, що передача енергії від кавітатора за синусоїдальним законом

функцією $x = x_0 \sin \omega t$ і враховуючи, що при $t = 0 (x = 0)$ й $t = \frac{\pi}{2\omega} (x = x_0)$, після перетворення отримаємо:

$$F = [R(0)\operatorname{ctg}\varphi - R(x_0)] \frac{x}{x_0} + R(x). \quad (3.33)$$

Це рівняння і описує динамічну петлю гістерезису з кутом нахилу поздовжньої осі θ (x_0 визначається із експериментів), обумовленим вираженням [281]:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{R(0)\operatorname{ctg}\varphi - R(x_0)}{x_0}. \quad (3.34)$$

Графічна інтерпретація рівняння (3.33) може бути представлена еліпсом [266, 272], площа якого виражає собою енергію, що розсіюється в кавітуючому середовищі за один період, а кут нахилу еліпсу визначає модуль пружності середовища в цей період (див. розд. 2.3.2).

Тоді, із петлі гістерезису випливає, що положення петлі гістерезису в координатах $F - x$ при даній амплітуді переміщення A_0 визначається кутом зсуву фаз φ , що залежить від співвідношення частоти ω вимушеної сили та резонансної частоти ω_0 , що відповідає амплітуді визначити коефіцієнт поглинання енергії ψ , який являється співвідношенням енергії розсіювання

ΔW до потенційної енергії W за цикл, $\psi = \Delta W / W$. Якщо цей коефіцієнт розділити на 2π , отримаємо коефіцієнт опору середовища за одне коливання:

$$\gamma = \frac{\Delta W}{2\pi W} = \frac{\psi}{2\pi}, \quad (3.35)$$

де 2π – число, що характеризує циклічність процесу деформації.

Фазовий метод. Сутність фазового методу для визначення швидкості розповсюдження хвиль приведена в розділі 2.3.2. Для визначення розсіювання енергії цей метод використовується наступним чином. Визначаємо кут зсуву фази φ між зовнішньою гармонійною силою й викликаним нею переміщенням. Надалі здійснюють визначення відносного розсіювання енергії в оброблювальному середовищі:

$$\psi = 2\pi \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \operatorname{tg} \varphi. \quad (3.36)$$

Ця залежність впливає з рішення рівнянь вимушених коливань при прийнятті еліптичної петлі гістерезису і фактично не відрізняється від класичної залежності для систем із в'язким тертям. В роботі [266] зазначено,

що при в'язкому опорі декремент вільних коливань $\delta_0 \approx \frac{\pi h}{\omega_0}$ і відповідне йому відносне розсіювання енергії має вид:

$$\psi_0 = 2 \frac{\pi h}{\omega_0}, \quad (3.37)$$

де $h = \frac{b}{2m}$ – коефіцієнт, що характеризує в'язкі властивості середовища.

При вимушених коливаннях із частотою $\omega \neq \omega_0$ коефіцієнт поглинання визначиться наступним вираженням:

$$\psi = 2 \frac{\pi h}{\omega^2} \omega = \psi_0 \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (3.38)$$

Використовуючи співвідношення для системи із в'язким тертям можна визначити фазовий кут, який опосередковано також визначає ступінь впливу розсіювання енергії [281]:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{h\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (3.39)$$

Залежності (3.36 – 3.39) отримані за умови, що середовище моделюється дискретними параметрами. Така модель використана в роботі [83], в якій коефіцієнт в'язкого тертя має розмірність $нс/м$, тобто представляє собою відношення сили опору до швидкості.

Енергетичний метод. Метод заснований на безпосередньому вимірі витрати електричної або механічної потужності акустичного апарату. При цьому в балансі всієї потужності P , яку звичайно легко виміряти, частина потужності P_κ витрачається безпосередньо на протікання технологічного процесу, а інша потужність P_{mp} витрачається на подолання опорів у самому акустичному апараті. Відносне розсіювання енергії в оброблювальному середовищі визначається по формулі [281]:

$$\psi = \frac{P - P_\kappa}{fW}, \quad (3.40)$$

де f – частота сталих коливань апарату; W – потенційна енергія деформованого середовища, що відповідає амплітуді сталих коливань.

Дана формула отримана за умови, що розсіювання енергії в збуднику коливань як на холостому ходу, так і при обробці середовища є однакове за числовим значенням.

Спектрально-кореляційний аналіз. Цей метод базується на теорії ймовірностей і може бути використаним при наявності багато частотного спектру коливань бульбашок у кавітаційній області, про що відмічається в роботі [30]. Характеристики спектрально-кореляційного аналізу (математичне очікування, дисперсія, спектральна щільність і т.п.) визначаються відомими методами теорії ймовірностей і математичної статистики [223, 224]. При аналізі випадкових вібрацій розрізняють вузько і широкополосні випадкові вібрації. Вузькополосні вібрації розділяють на вібрації з постійною частотою й змінною амплітудою, та вібрації зі змінною середньою частотою й амплітудою. Вузькополосні процеси виникають як реакція технологічного

середовище на дію акустичного апарату з малим демпфіруванням на широкополосне збурювання. Середнє значення частоти ω_{cp}^2 визначається по формулі Райса [224]:

$$\omega_{cp}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_x(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega} = \frac{R_{\ddot{x}}(0)}{R_x(0)} = \frac{\sigma_{\ddot{x}}^2}{\sigma_x^2}, \quad (3.41)$$

де $S_x(\omega)$ – спектральна щільність, що визначає розподіл дисперсії.

Якщо в системі «кавітатор – середовище» виникають резонанси і збудливі коливання являють собою гаусів білий шум, то математичне очікування частоти ω_{cp} , збігається із власною частотою ω_i цієї системи. Знаючи математичне очікування частоти ω_{cp} , можна визначити огинаючу вузькополосового процесу

$$A(t) = x^2(t) + (\dot{x}^2(t)) / \omega_{cp}^2. \quad (3.42)$$

Одномірна щільність імовірності $A(t)$ підкоряється закону розподілу Релея [225]:

$$P = (x_0 / \sigma^2) e^{-x_0^2 / 2\sigma^2} \in, \quad (3.43)$$

де x_0 – пікові значення реакції системи, що викликаються нормальним випадковим процесом.

Числові значення x_0 можна знайти, підставивши у формулу (3.43) значення σ .

Метод згасаючих коливань. Цей метод полягає в наявності згасаючих коливань системи, яка досліджується і по яким може бути визначений логарифмічний декремент коливань δ . Для визначення декременту коливань віброграма руху бульбашки розбивається на ділянки із числом циклів n . Середнє значення декременту δ на ділянці визначається за виразом [281]:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_i}{x_{i+n}}. \quad (3.44)$$

Отриманий декремент приписується середній амплітуді на даній ділянці:

$$x_{icp} = \frac{x_i + x_{i+n}}{2}.$$

або середньому амплітудному значенню напруження:

$$\sigma_{icp} = \frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2}.$$

Визначення декременту за віброграмою згасаючих коливань можна спростити, представивши його у вигляді наступного ряду [281]:

$$\delta = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = 2 \frac{x_i - x_{i+1}}{x_i + x_{i+1}} + \frac{1}{3 \cdot 2^2} \left(2 \frac{x_i - x_{i+1}}{x_i + x_{i+1}} \right)^3 +$$

$$+ \frac{1}{5 \cdot 2^4} \left(2 \frac{x_i - x_{i+1}}{x_i + x_{i+1}} \right)^5 + \dots + \frac{1}{(2n+1) 2^{2n}} \left(2 \frac{x_i - x_{i+1}}{x_i + x_{i+1}} \right)^{2n+1} + \dots$$

Навіть для більших відношень амплітуд коливань $\frac{x_i}{x_{i+1}}$ значення декременту визначається першим членом ряду. Так, за умови відношення $\frac{x_i}{x_{i+1}} = 2$ похибка від всіх інших членів становить менш 4%. Тому з досить високим ступенем точності можна прийняти залежність для визначення декременту коливань [281]:

$$\delta = 2 \frac{x_i - x_{i+1}}{x_i + x_{i+1}} = \frac{\Delta x_1}{x_{icp}}. \quad (3.45)$$

Середнє значення декременту коливань на ділянці із числом циклів n визначиться в цьому випадку формулою:

$$\delta = \frac{2(x_i - x_{i+n})}{x_i + x_{i+1}} = \frac{\Delta x_1}{n x_{icp}}. \quad (3.46)$$

Визначити коефіцієнт δ можна і через коефіцієнт поглинання енергії Ψ [272]:

$$\delta = \Psi / 2, \quad (3.47)$$

де $\gamma = \frac{\Psi}{2\pi} = \frac{\Delta\Pi}{\Pi}$ ($\Delta\Pi$ – енергія, що поглинається системою за один період коливань; Π — потенціальна енергія системи).

Застосовують у розрахунках і коефіцієнт втрат:

$$\gamma = \frac{\Psi}{2\pi} = \frac{\Delta V}{\pi} \quad (3.48)$$

Враховуючи (3.47), (3.48) і за умови, що період бульбашки T , яка має масу m і коефіцієнт пружності C дорівнює: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$, отримаємо формулу для визначення коефіцієнта опору b :

$$b = \frac{\Psi C}{2\pi\omega} = \gamma \frac{C}{\omega} \quad (3.49)$$

Формула (3.49) в дещо видозміненому вигляді із збереженням розмірності коефіцієнта b у вигляді $[нс/м]$ використовувалася в роботі [83] при оцінці коефіцієнта опору (рис. 3.6).

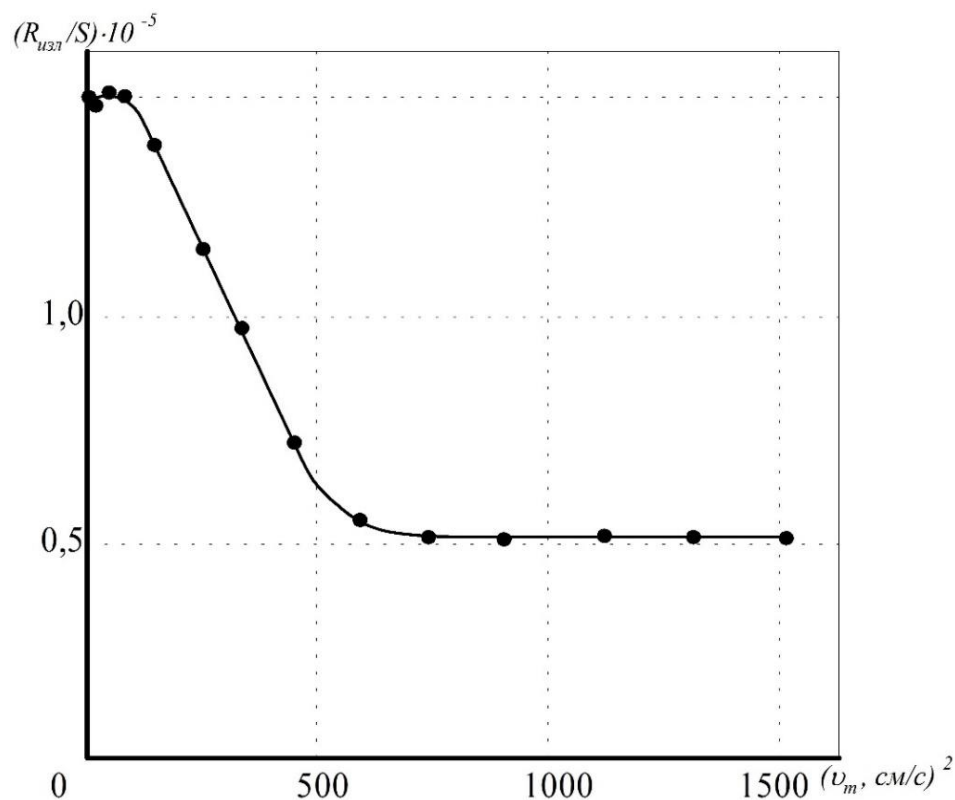


Рисунок 3.6 – Зміна коефіцієнта опору в залежності від квадрата зміни швидкості коливань

Із графіка (див. рис. 3.6) слідує, що опір суттєво впливає на процес кавітації та відчутно змінюється, особливо на початковій стадії кавітаційної обробки. В цілому параметри, що визначають частку енергії на опір і знайдені різними методами, знаходяться між собою в наступних співвідношеннях [185]:

$$\gamma = \frac{\Delta W}{2\pi W} = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{bT}{2\pi m} = \frac{T}{\pi\tau}, \quad (3.50)$$

де γ – коефіцієнт опору; $\psi = \Delta w/w$ – коефіцієнт поглинання енергії за один період в одиниці об'єму середовища; Δw – енергія, що розсіюється; w – енергія, що підводиться до матеріалу; m – маса середовища, що коливається; T – період коливань середовища; τ – час релаксації середовища при зменшенні амплітуди коливань його в e раз.

Виконаний огляд та оцінка існуючих методик експериментального дослідження в'язких та пружних властивостей технологічного середовища дозволяє зазначити наступне.

1. Метод, що заснований на залежності кута зсуву фази φ (формули 3.36 або 3.38) між силою або тиском в зоні контакту акустичного апарату та середовища й викликуваним ними переміщенням може бути використаним для оцінки рівня розсіювання енергії.

2. В даний час існують два основні методи вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі: інтерферометричний і імпульсний. Інтерферометричний метод заснований на визначенні довжини ультразвукової хвилі при відомій частоті коливань. Імпульсний метод – на вимірі проміжку часу, протягом якого ультразвукова хвиля проходить відому відстань.

3. Вимірювання швидкості розповсюдження хвиль в технологічному середовищі здійснюється шляхом порівняння фаз двох сигналів – які пройшли від контактної зони кавітатора через досліджуване середовище до жорсткої границі. Порівняння фаз здійснюється або в акустичному (на перетворювачі) або електричному (у вимірювальному приймачі) трактах.

3.3 Результати досліджень в'язких та пружних характеристик і параметрів обробки технологічного середовища в режимі зародження і розвитку кавітаційного процесу

Основна мета дослідження в'язких та пружних властивостей технологічного середовища полягає у вирішенні таких задач:

- виявити числові значення параметрів, які оцінюють в'язкі та пружні властивості технологічного середовища та визначити закони їх зміни для розробки фізичної та математичної моделі досліджуваної системи «кавітатор – технологічне середовище»;

- з'ясувати ступінь впливу в'язких та пружних властивостей на стадіях зародження, розвитку та сплескування ансамблю бульбашок технологічного середовища ;

- визначити необхідні значення параметрів акустичного апарату(частоту, інтенсивність та необхідну потужність для конкретного середовища).

Очевидно, що ці задачі пов'язані між собою.

3.3.1 Результати досліджень в'язких характеристик технологічних середовищ

На основі огляду існуючої літератури (див. розд. 1), виконаних досліджень та здійсненого аналізу [16–33] визначена класифікація технологічних середовищ за їх в'язкістю (табл. 3.1).

Надалі ця класифікація використана при визначенні параметрів кавітаційного процесу обробки різних за складом технологічних середовищ (див. розд.6). Однією із характеристик згасання ультразвуку є розсіяння енергії, яку визначається в'язкими властивостями технологічного середовища.

Визначення та вплив в'язких властивостей здійснюється опосередкованим методом на основі наступних міркувань. Так, відомим фактом є те, що поширення ультразвуку в технологічному середовищі

супроводжується поглинанням енергії у ньому. Внаслідок цього відбувається зниження амплітудного значення звукового тиску при віддаленні від джерела ультразвукових коливань.

Таблиця 3.1 – Класифікація технологічних середовищ за їх в'язкістю

В'язкість, мПа·с	Класифікаційна ознака	Середовище
від 5 до 30	малої в'язкості	водні та спиртові розчини
від 30 до 400	середньої в'язкості	мастильні матеріали
від 400 до 1000	в'язкі	полімерні матеріали
від 1000 до 3000	збільшеної в'язкості	лакофарбові матеріали
від 3000 до 10000	великої в'язкості	епоксидні смоли

Разом з тим, найчастіше [18, 93] оцінюють не зменшення амплітуди звукового тиску, а зміну інтенсивності ультразвукових коливань:

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot x}, \quad (3.51)$$

де $I(x)$ – інтенсивність ультразвукових коливань у точці з координатою x ; $I(0)$ – інтенсивність ультразвукових коливань на початку координат; α – коефіцієнт згасання ультразвуку.

Виходячи з цього, коефіцієнт згасання ультразвуку може бути розрахований за результатами вимірів згідно формули:

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot (x_2 - x_1)} \cdot \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right), \quad (3.52)$$

де x_2 і x_1 – координати точок вимірів; I_1 і I_2 – інтенсивності ультразвукових коливань у відповідних точках вимірів.

Інтенсивність ультразвукових коливань пов'язана з амплітудою звукового тиску співвідношенням:

$$I = \frac{p^2}{2 \cdot \rho \cdot c}. \quad (3.53)$$

Вважаючи, що зміна щільності та швидкості звуку мало залежать від величини звукового тиску (що справедливо для докавітаційного режиму

роботи і режиму слабо розвиненої кавітації), залежність (2) може бути записана у вигляді:

$$\alpha \approx \frac{1}{2 \cdot (x_2 - x_1)} \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2. \quad (3.54)$$

Звідки:

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right). \quad (3.55)$$

Тепер необхідно вибрати метод застосування формули (3.55). Проблема полягає у визначенні інтенсивності ультразвукових коливань I_1 та I_2 або амплітуд звукового тиску P_1 і P_2 у відповідних точках вимірів x_1 і x_2 . Рішенням може бути спосіб застосування акустичного методу за допомогою гідрофонів, який є одним із перспективних для вимірювання конфігурації кавітаційної області та інтенсивності кавітаційних процесів [18]. Цим методом на виході гідрофона генерується величина електричної напруги (заряду), яка пропорційна величині звукового тиску. Таким чином встановлюється взаємна відповідність між електричною напругою та звуковим тиском. Тоді, переходячи від значень звукових тисків (4) до напруг на затискачах гідрофона, можна отримати наступну залежність:

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \cdot \ln \left(\frac{U_1}{U_2} \right), \quad (3.56)$$

де U_1 та U_2 – напруга на затискачах гідрофона в точках вимірів.

Отже, аналізуючи спектральний склад сигналу гідрофона можна опосередковано судити про інтенсивність кавітаційних процесів. Геометричні розміри гідрофона зводяться до мінімальних, що дозволяє зменшувати ступінь викривлення звукового поля при його використанні. Метод дозволяє досліджувати як форму звукового поля, так і давати оцінку інтенсивності кавітаційних процесів. Під час роботи в режимі приймання на обкладинках п'єзoeлемента гідрофона з'являється різниця потенціалів, величина якої пропорційна звуковому тиску. Калібрування гідрофонів може здійснюватися різними методами, наприклад, стандартним методом взаємності [16]. Слід зазначити, що вимірювання величини електричної напруги, пропорційної

звуковому тиску, може бути здійснено різними способами, а саме: вольтметром пікового значення, вольтметром середнього значення та вольтметром середньоквадратичного значення. При цьому вимір різними способами призведе до різних результатів. Це пов'язано з тим, що при появі кавітаційних явищ, форма електричної напруги на гідрофоні буде істотно відрізнятися від гармонійної (рис. 3.7).

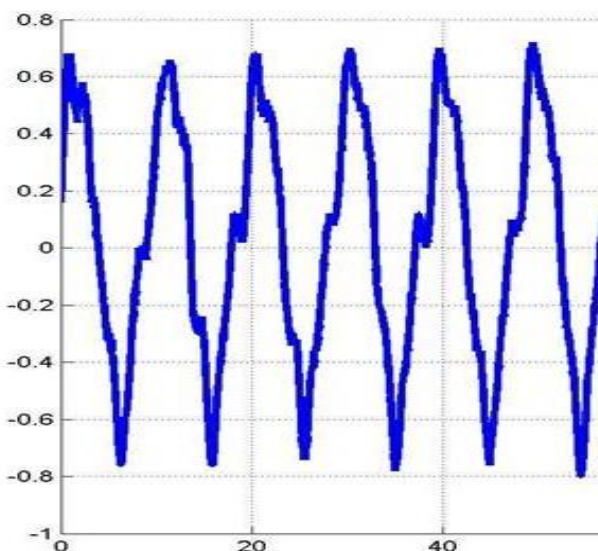
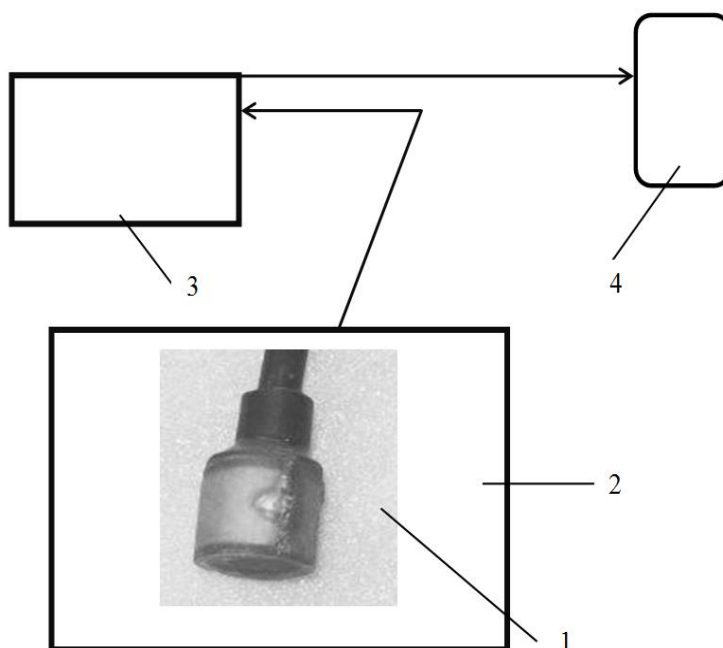


Рисунок 3.7 – Форма напруги на гідрофоні при виникненні кавітації

Виходячи з того, що форма вимірюваної напруги суттєво відрізняється від гармонійної, вимірювання здійснювали вольтметром середньоквадратичних значень ВЗ-57. Зокрема, для використаного у вимірах гідрофона (рис. 3.8) чутливість була $M = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ В / Па}$. При цьому виміряна напруга буде пропорційна не лише звуковому тиску, а й інтенсивності ультразвукових коливань.

У результаті експериментів та їх обробки були визначені коефіцієнти згасання коливань технологічних середовищ з різними реологічними властивостями, за якими розраховувалися коефіцієнти в'язкості.

В цілому можна зазначити, що вплив в'язкості є суттєвим за малих значень амплітуд на початковій стадії утворення бульбашок, які мають невеликі радіуси.



1 – гідрофон; 2 – ванна з технологічним середовищем; 3 – апаратура для реєстрації сигналу ; 4 – апаратура для запису сигналу

Рисунок 3.8 – Схема вимірювання параметрів кавітаційного процесу гідрофоном

На бульбашки з великим початковим радіусом в'язкість впливає мало. Пояснюється це тим, що на початковій стадії бульбашки малого радіусу внаслідок дії в'язких сил стримуються в своєму збільшенні. Цей висновок є логічним і для інтенсифікації процесу кавітації для застосування керованості процесу шляхом підвищення акустичного тиску. Такий результат засвідчує, що, можливо, процес утворення бульбашок є певною мірою спонтанним, з відсутністю одномоментного сплескування бульбашок і потребує наявності змінного амплітудно-частотного спектру навантаження від акустичного апарату.

Коефіцієнт поглинання залежить від частоти ультразвукової хвилі, температури та властивостей середовища. Коефіцієнти в'язкості для деяких рідин приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти в'язкості

№, п/п	Назва середовища	Щільність, ρ кг/м ³	Коефіцієнт в'язкості, $\mu \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$
1	вода	1000	0,82
2	етиловий спирт 96%	798	1,2
3	трансформаторне масло	900	30
4	оливкова олія	950	85

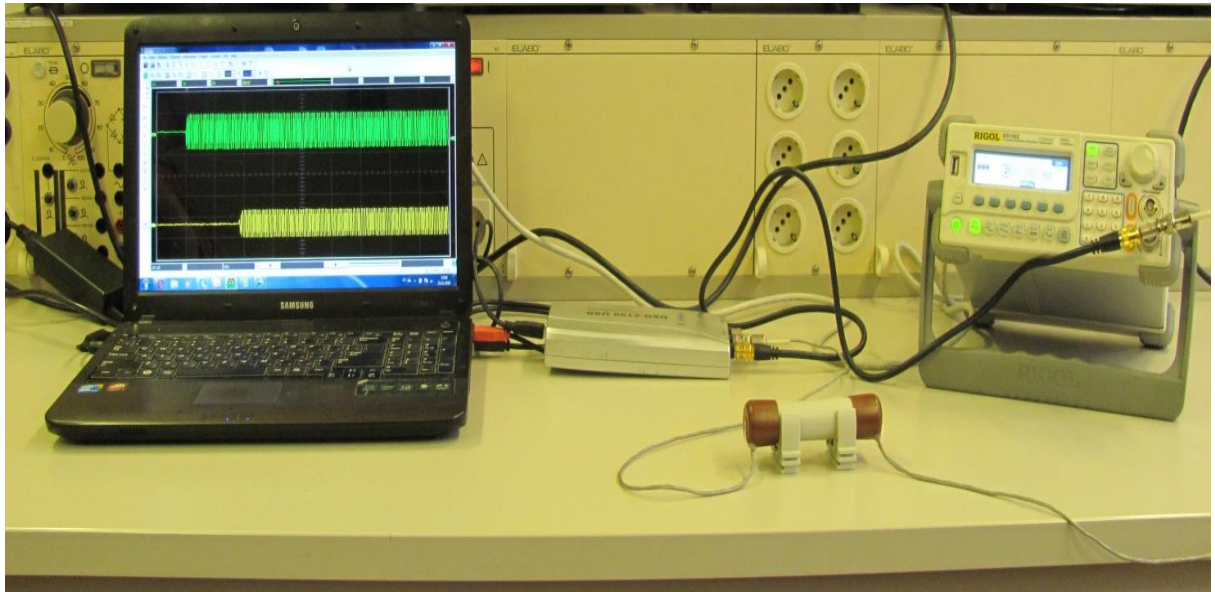
Отже, коефіцієнт в'язкості середовища є важливим параметром, що впливає на утворення кавітаційних бульбашок, їх розвиток і на заключний етап технологічного процесу – стискування і сплескування. Варто зауважити, що, в'язкість може впливати і на утворення та розвиток форми бульбашки, яка зазвичай приймається у вигляді сфери. Таким чином, формування структури реакції середовища на коливання акустичного апарату має враховувати в'язкі властивості середовища.

3.3.2 Результати досліджень пружно-інерційних характеристик технологічних середовищ

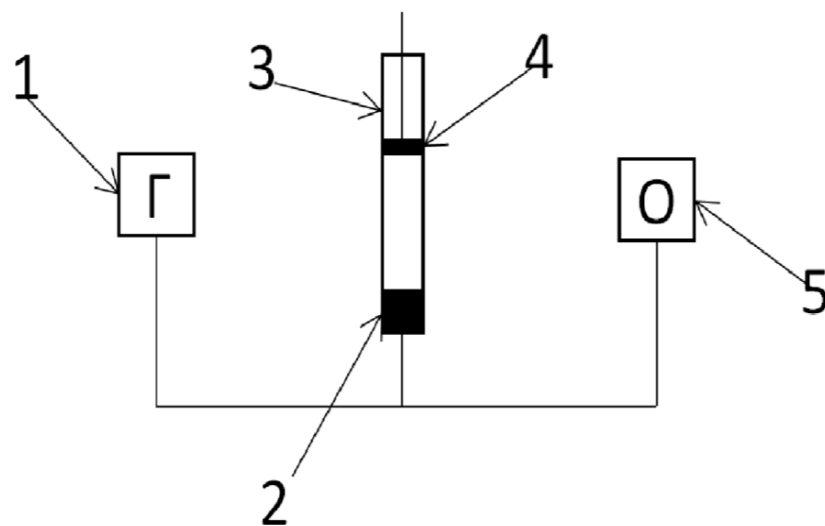
Як було зазначено у другому розділі, одним із найважливіших параметром, від якого залежить вплив пружно-інерційних характеристик технологічного середовища на протікання кавітаційного процесу є швидкість розповсюдження хвиль c . Методикою (див. розд. 2) вибрано метод визначення швидкості розповсюдження хвиль c (рис. 3.9).

Від генератора імпульсів 1 до випромінювача 2 посиляється електричний сигнал фіксованої ультразвукової частоти.

Датчик, який в даному випадку є випромінювачем і приймачем, перетворює надійшовший сигнал в пружні коливання тієї ж частоти (зворотний п'єзоефект), який проходить через шар технологічного середовища.



а



б

а – загальний вигляд; б – схема;

1 – генератор імпульсів, 2 – випромінювач; 3 – трубка із технологічним середовищем; 4 – відбивач; 5 – комп'ютер

Рисунок 3.9. Вимірювання швидкості розповсюдження хвиль в технологічному середовищі

Приймач перетворює пружні коливання ультразвукової частоти в електричний сигнал тієї ж частоти (прямий п'єзоефект) і подає сигнал на екран комп'ютера 5. На екрані комп'ютера відображені генераторний імпульс і сигнал, що пройшов через трубку із технологічним середовищем.

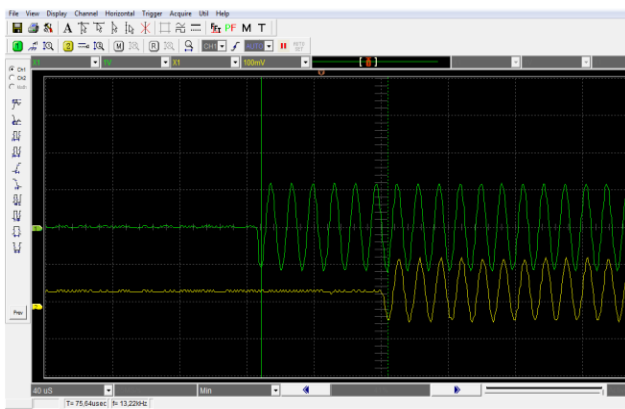
Відстань між ними h характеризує час t проходження пружних коливань від джерела до відбивача і назад. Отже, швидкість розповсюдження хвиль в технологічному середовищі визначається за формулою:

$$c=h/ t. \quad (3.57)$$

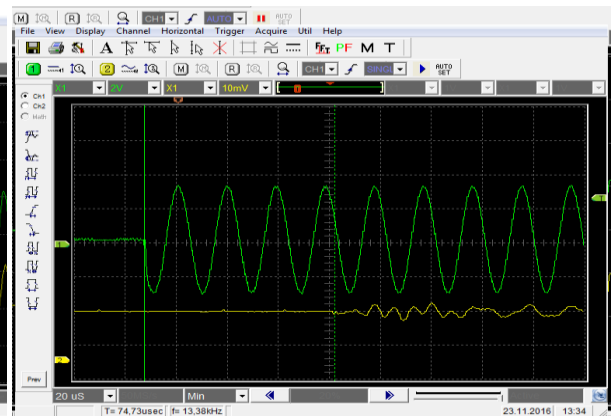
На рис. 3.10 і 3.11 приведені характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів різних технологічних середовищ, обробкою яких визначено швидкість розповсюдження хвиль (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Числові значення швидкості
технологічних середовищ

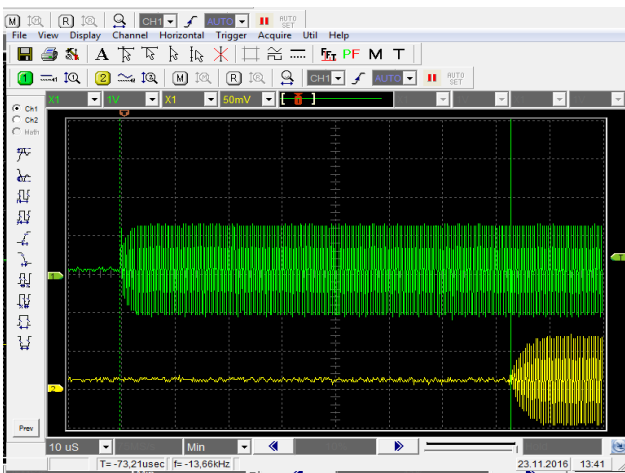
Середовище	Швидкість звуку, м/с	Щільність, кг/м ³
Вода	1484	1000
Морська вода	1531	1030
Моторне масло	1385	860
Оливкове масло	1381	950
Касторове масло	1477	850
Дизельне масло	1250	850
Смола епоксидна	2580	1200
Гліцерин	1923	1270
Керосин	1324	800
Сірчана кислота	1440	1830
Ацетон	1174	810
Метанол	1103	792
Етиловий спирт	985	798



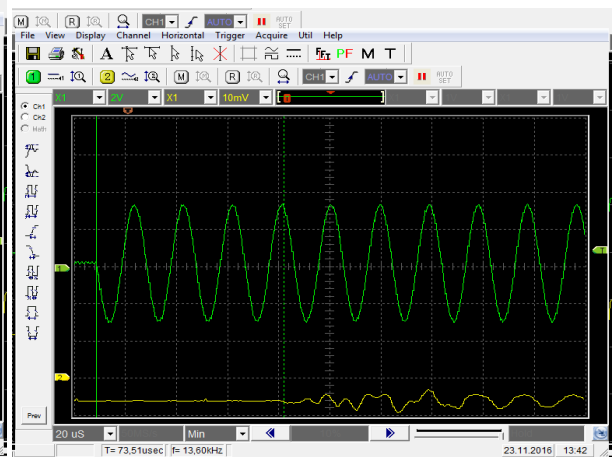
a



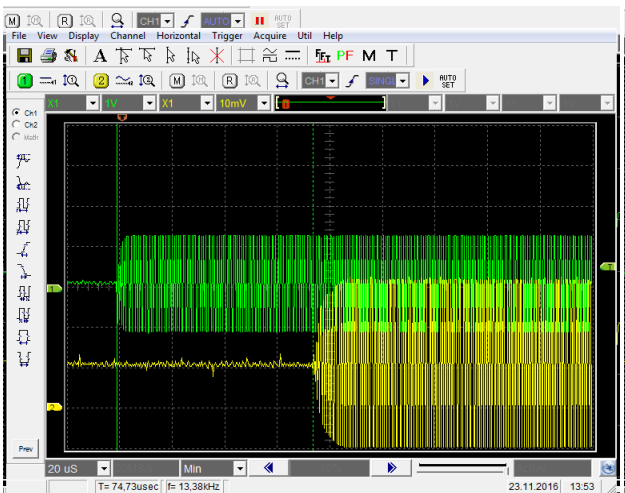
б



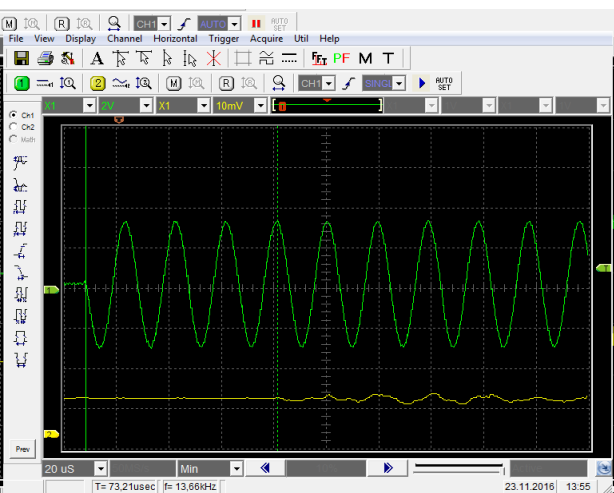
в



г



д

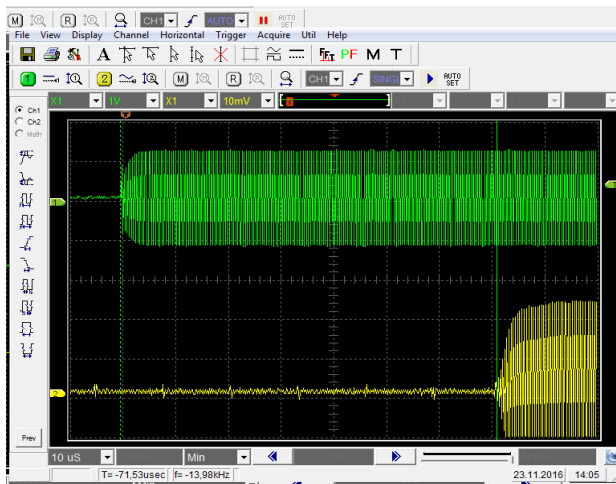


е

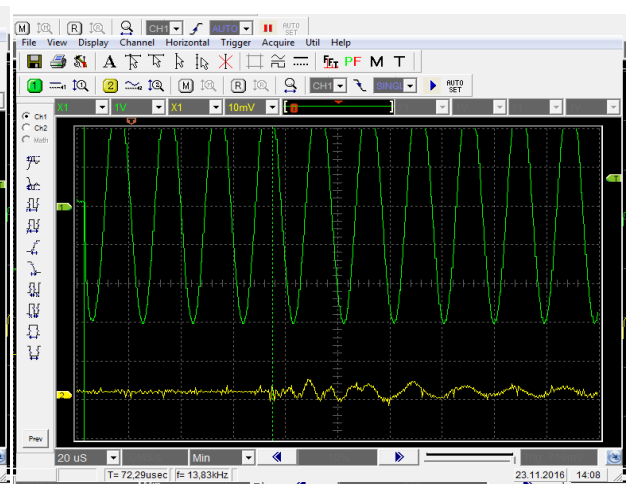
вода: $f = 2,58 \text{ МГц}$ – а, $f = 52 \text{ кГц}$ – б; молоко: $f = 2,58 \text{ МГц}$ – в, $f = 52 \text{ кГц}$ – г;

касторове масло: $f = 2,58 \text{ МГц}$ – д, $f = 52 \text{ кГц}$ – е

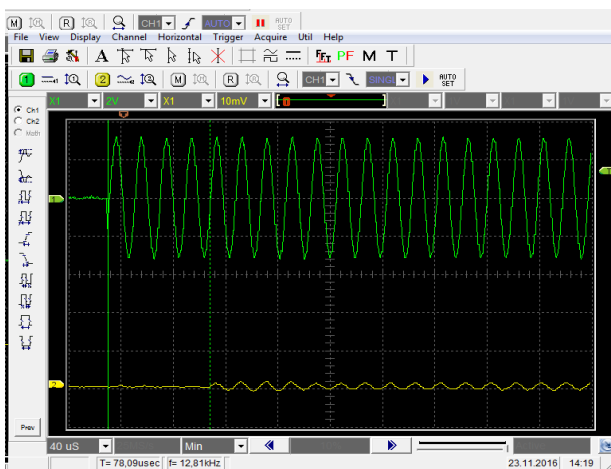
Рисунок 3.10 – Характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів технологічних середовищ



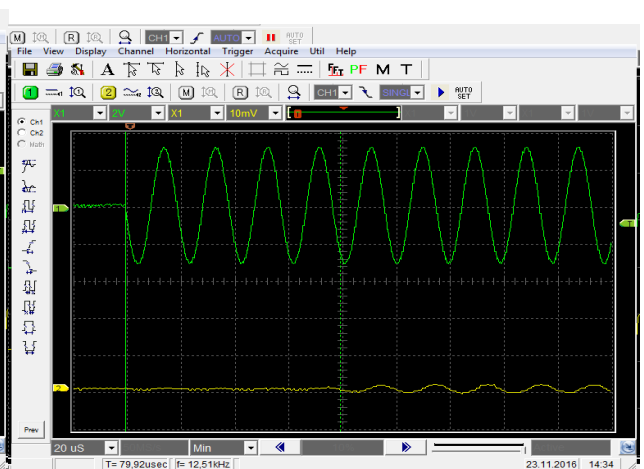
а



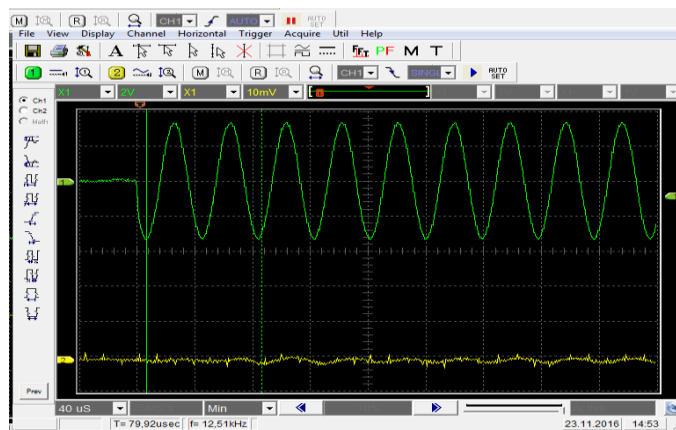
б



в



г



д

розчин пігментної пасти: $f = 2,58 \text{ МГц}$ – а, $f = 52 \text{ кГц}$ – б; оливкове масло: $f = 52 \text{ кГц}$ – в; фарба водоемульсійна: $f = 52 \text{ кГц}$ – г; гліцерин: $f = 52 \text{ кГц}$ – д

Рисунок 3.11 – Характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів технологічних середовищ

3.4 Дослідження впливу хвильового опору середовища на дію акустичного апарату

Хвильовий опір середовища на дію акустичного апарату представляє собою відношення акустичного тиску P_a до коливальної швидкості v частинок середовища:

$$Z_a = \pm p_a / v. \quad (3.58)$$

За розмірністю коефіцієнт $Z_a = H / (m^3 \cdot c) = \kappa g / (m^2 \cdot c)$. Важливість знання коефіцієнта Z_a полягає в тому, що він є важливою характеристикою взаємодії системи «акустичний апарат – середовище», не тільки як опір, а як і характеристика хвильового руху. Важливість впливу хвильового опору середовища на протікання кавітаційного процесу підтверджується і в роботах [49 – 56]. Разом з тим, важливим аспектом розповсюдження акустичної хвилі є взаємодія границі системи «апарат – середовище», що має інші параметри, то в середовище переходить тільки частина потужності хвилі, а друга частина буде відображеною від межі контакту до апарату.

Тому очевидною задачею ефективного акустичного апарату є така його конструкція, яка забезпечує передачу максимальної енергії для реалізації кавітаційного процесу. Саме тому в формулі (3.58) варто враховувати знаки: верхній (плюс) ототожнює хвилю, що пройшла від поверхні випромінювання в середовище (падаюча хвиля), а нижній (мінус) для хвилі, що йде в зворотному напрямку, тобто повертається в апарат (відбита від границі системи «апарат – технологічне середовище» хвиля). Очевидно, що для ефективної передачі енергії акустичної хвилі властивості апарату і середовища мають бути узгоджені між собою.

Ця узгодженість полягає в тому, що їхні хвильові опори мають бути однакові, що в реальних умовах процесу кавітації практично неможливо. Дійсно, акустичний опір для твердих матеріалів, з яких виготовляється

випромінююча поверхня акустичного апарату, та опір технологічного середовища, суттєво відрізняються між собою.

Наприклад, такий твердий матеріал, як сапфір, має акустичний опір для повздовжніх хвиль: $Z_a = 44,3 \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а для води $Z_a = 1,5 \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, для повітря $Z_a = 4,27 \cdot 10^2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [85]. Порівнюючи ці цифрові значення, стає очевидним те, що для вирішення задач раціонального конструювання акустичного апарату та визначення його параметрів, необхідно аналітично дослідити послідовність акустичного погодження апарату і технологічного середовища з метою отримання умови максимальної передачі енергії до оброблювального середовища. Для цього розглянемо процес розповсюдження акустичної хвилі від поверхні випромінювання апарату до оброблювального середовища (рис. 3.12).

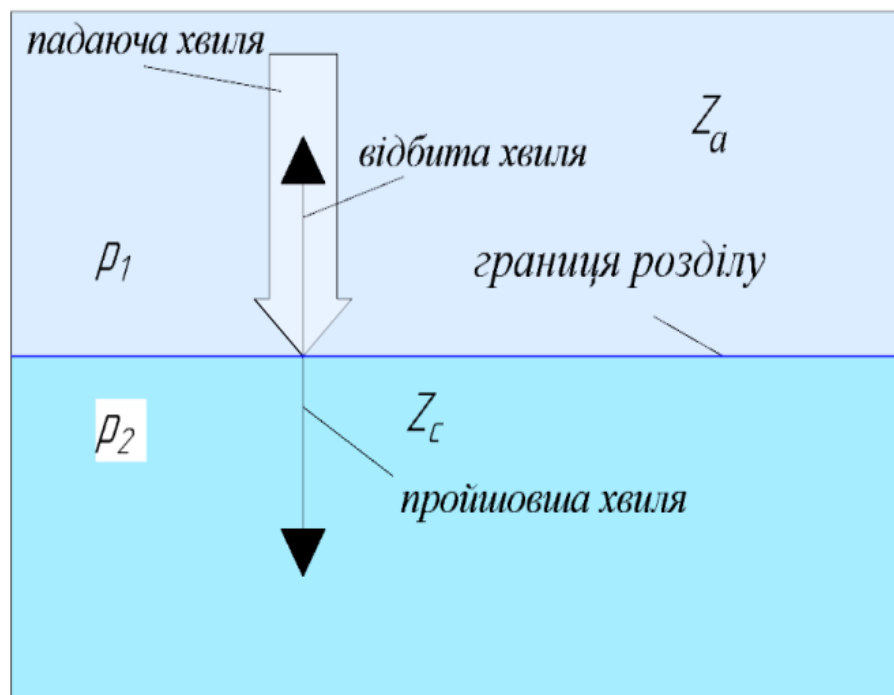


Рисунок 3.12 – Проходження та відбивання падаючої хвилі на границі розділу системи «випромінююча поверхня кавітаційного апарату – технологічне середовище»

Будемо вважати, що плоска акустична хвиля по осі X від апарату до границі з середовищем розповсюджується з акустичним опором Z_a , а в середовищі на границі з поверхнею випромінювання апарату по цій же осі X , внаслідок дії цього опору, виникає хвильовий опір Z_c . Цілком очевидно, що окрім хвилі, яка передається в середовище, виникає на межі контакту поверхні випромінювання з середовищем хвиля, яка рухається в зворотному напрямку. Таким чином, утворюється складне хвильове поле, яке можна представити коефіцієнтами проходження та відбиття хвилі у вигляді:

$$\begin{aligned} K_{\text{від}} &= p_{\text{авід}} / p_{\text{анад}}; \\ K_{\text{пр}} &= p_{\text{анад}} / p_{\text{авід}}. \end{aligned} \quad (3.59)$$

По аналогії із рішенням рівняння руху можна записати вирази для падаючої і відбитої хвиль тиску і швидкості:

$$\begin{aligned} p(x) &= p_{\text{анад}} e^{-ik_1 x} + p_{\text{авід}} e^{ik_1 x}; \\ v(x) &= v_{\text{хнад}} e^{-ik_1 x} + v_{\text{хвід}} e^{ik_1 x}, \end{aligned} \quad (3.60)$$

де $k_1 = \omega_1 / c_1$, – хвильове число; i – мнима одиниця.

Застосовуючи умову безперервності параметрів руху в контактній зоні системи «апарат – середовище» (відсутність порушення суцільності):

$$\begin{aligned} p_a &= p_c; \\ v_a &= v_c \end{aligned} \quad (3.61)$$

отримаємо:

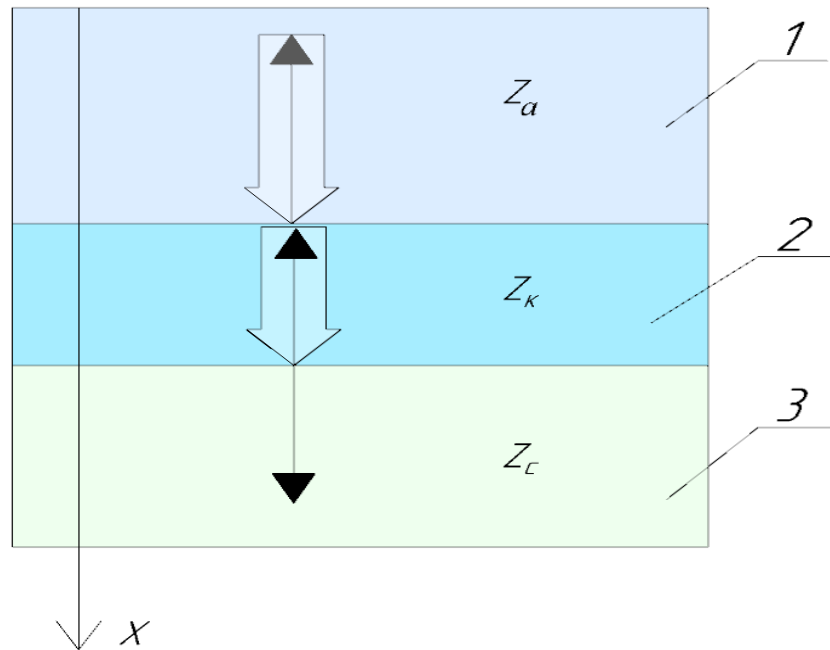
$$\frac{p_{\text{анад}}}{Z_a} - \frac{p_{\text{авід}}}{Z_a} = \frac{p_{\text{анп}}}{Z_c}. \quad (3.62)$$

Розділивши ліву і праву частини на амплітуду акустичного тиску $p_{\text{анад}}$ і використовуючи (3.59) отримаємо вирази для визначення коефіцієнтів відбиття і проходження хвилі:

$$\begin{aligned} K_{\text{від}} &= (Z_c - Z_a) / (Z_c + Z_a); \\ K_{\text{пр}} &= 2Z_c / (Z_c + Z_a). \end{aligned} \quad (3.63)$$

Умову визначення хвильового опору для його максимального проходження можливо реалізувати шляхом введення між границею поверхні

випромінювання апарату і середовища компенсатора, який виконує роль опору навантаження і відбиття акустичних хвиль виключно в зоні апарату (рис. 3.13).



1 – кавітатор; 2 – компенсатор; 3 – середовище

Рисунок 3.13 – Проходження та відбивання падаючої хвилі в системі «поверхня випромінювання кавітаційного апарату – компенсатор – технологічне середовище»

При цьому опір навантаження має бути рівним хвильовому опору середовища: $Z_k = Z_c$.

Використовуючи рішення (3.60) із заміною $x = l$, де l – довжина поверхні випромінювання апарату де розповсюджується хвиля, отримаємо опір в перерізі ($x = -l$):

$$Z_{\text{ex}}(x = -l) = \frac{p_a(-l)}{v(-l)} = Z_a \left[\frac{e^{ik_1 l} + k_{\text{eid}} e^{-ik_1 l}}{e^{ik_1 l} - k_{\text{eid}} e^{-ik_1 l}} \right]. \quad (3.64)$$

З врахуванням виразу (3.66):

$$Z_{ex} = -l = Z_a \frac{Z_c \cos k_1 l + i Z_a \sin k_1 l}{Z_a \cos k_1 l + i Z_c \sin k_1 l} . \quad (3.65)$$

Якщо прийняти, що між поверхнею випромінювання апарату і середовищем встановлено компенсатор довжиною $l = \lambda/4$, де λ – довжина хвилі в компенсаторі, то отримаємо наступну залежність:

$$k_1 l = (2\pi / \lambda) / (\lambda / 4) = \pi / 2 . \quad (3.66)$$

Підставляючи (3.64) у (3.65) отримаємо вираз для визначення вхідного хвильового опору:

$$Z_{ex}(\lambda / 4) = Z_a^2 / Z_c . \quad (3.67)$$

Отже, вибираючи значення вхідного опору компенсатора довжиною $\lambda/4$ отримаємо умову максимальної передачі, за якою хвильовий опір апарату і компенсатора узгодженні. Дійсно, розташовуючи між границею апарату і середовищем допоміжний шар матеріалу з таким акустичним опором, можна забезпечити рівність акустичного опору апарату і еквівалентної лінії передачі. Тоді хвилі відбиття від обох границь додатково встановленого шару будуть рівні за амплітудою і рухатимуться в протифазному напрямку, що і приведе до їхньої взаємної компенсації. А зсув між фазами руху на 180° забезпечується різницею ходу хвиль між границями за половиною довжини хвилі. Рівність амплітуд забезпечується раціональним вибором хвильового опору компенсатора. Якщо компенсатор має власні параметри: опір Z_k , хвильове число k_k і товщину l_k , тоді за умовою, що $l_k = \lambda_k / 4$ – вхідний опір на границі $x = -l_k$:

$$Z_{ex} = Z_k^2 / Z_c . \quad (3.68)$$

Для виконання умови, за якої відбиті хвилі від перерізу $x = -l_k$ були відсутніми, вхідний опір (3.65) має рівнятися акустичному опору апарату Z_1 :

$$Z_a = Z_k^2 / Z_c . \quad (3.69)$$

Із (3.69) отримаємо вираз для розрахунку акустичного опору компенсатора:

$$Z_k = \sqrt{Z_a Z_c} . \quad (3.70)$$

Для застосування залежності (3.70), що дає можливість узгодити акустичний опір апарату і середовища, необхідно визначити реальні числові значення хвильового опору технологічних середовищ в умовах їхньої кавітаційної обробки.

3.5 Висновки по розділу

1. Метод, що заснований на залежності кута зсуву фази (3.36 або 3.38) між силою або тиском в зоні контакту випромінюючої поверхні акустичного апарату та середовища й викликуваним ними переміщенням може бути використаним для оцінки рівня розсіювання енергії.

2. В даний час існують два основні методи вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі – інтерферометричний і імпульсний. Інтерферометричний метод заснований на визначенні довжини ультразвукової хвилі при відомій частоті коливань. Імпульсний метод – на вимірі проміжку часу, протягом якого ультразвукова хвиля проходить відому відстань.

3. Вимірювання швидкості розповсюдження хвиль в технологічному середовищі здійснюється шляхом порівняння фаз двох сигналів, які пройшли від поверхні випромінювання кавітатора через досліджуване середовище до жорсткої границі. Порівняння фаз здійснюється або в акустичному (на перетворювачі) або електричному (у вимірювальному приймачі) трактах.

4. Виявлено вплив реологічних властивостей технологічних середовищ на процеси утворення, розвиток та сплескування кавітаційних бульбашок.

5. Знання коефіцієнта в'язкості технологічного середовища є необхідною умовою для визначення рівня енергії, що витрачається на складові процесу зародження та розвитку кавітації. При цьому в'язкість може впливати і на утворення, і розвиток форми бульбашки, що потребує уточнення фізичної та математичної моделі кавітаційного процесу. Такий висновок засвідчує про необхідність розгляду математичної моделі як системи з розподіленими

параметрами, а існуючий підхід у вигляді, так званої, «приєднаної маси» втрачає сенс, оскільки в'язка складова опору має суттєвий вплив.

6. Визначення коефіцієнта в'язкості технологічного середовища можливі на основі розгляду контактної задачі взаємодії поверхні випромінювання кавітаційного апарату і середовища.

7. Оцінка пружно-інерційних властивостей середовища при протіканні кавітаційного процесу потребує достовірного знання швидкості розповсюдження звуку, числові значення яких за даними різних досліджень коливаються в достатньо широких межах, діапазон розбіжності сягає декілька знаків. Така ситуація зумовлена різними підходами експериментальних досліджень та відсутністю загального уявлення стосовно визначення процесу протікання кавітації.

8. Зміна швидкості розповсюдження хвиль і різке падіння щільності внаслідок утворення порожнин в рідині спонукає до значного зменшення хвильового опору середовища, що має бути враховано при обґрунтуванні параметрів і режимів кавітаційного апарату.

РОЗДІЛ 4

ЕНЕРГЕТИКА КАВІТАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

4.1 Загальний підхід до оцінки складових енергії акустичної обробки технологічного середовища

Енергія, що концентрується в контактній зоні «перетворювач кавітатора – середовище», є головним чинником досягнення бажаного результату забезпечення ефективного протікання процесу обробки чи створення технологічного середовища ультразвуковою кавітацією. Тому питанню визначення та перетворення енергії приділялася та приділяється значна увага дослідників. Відзначається, що кавітаційна кумуляція енергії є найбільш ефективним способом кумуляції з усіх відомих методів концентрації енергії, що оцінюється відношенням щільності енергії в кавітаційній бульбашці до щільності енергії акустичного поля.

Висока щільність енергії в кавітаційній бульбашці пояснюється в першу чергу дуже малим об'ємом речовини в момент досягнення бульбашкою мінімального радіусу. Початковий (мінімальний) радіус бульбашки знаходиться в межах $R_0 = (1-10) \cdot 10^{-6}$ м, а змінюється при ультразвуковій кавітації в кінці стиснення до числових значень $R_{\max} = 10^{-7} - 10^{-8}$ м, що свідчить про суттєву зміну об'єму бульбашки (і щільності газу). Така зміна і викликає екстремальну концентрацію спочатку запасеної бульбашкою енергії. Енергія запасается при розширенні бульбашки від початкового радіуса R_0 до максимального радіуса R_{\max} під впливом розтягувальних сил, які виникають в рідині у фазі розрідження акустичної хвилі. Величина запасеної енергії визначається залежністю:

$$E = p\Delta V, \quad (4.1)$$

де ΔV – зміна об'єму бульбашки при зменшенні його радіусу з R_{\max} до R_{\min} ; p – тиск в навколишній рідині.

За очевидної умови, що $R_{\max} \gg R_{\min}$, що має місце при кавітації, отримаємо наступний вираз для визначення енергії:

$$E = \frac{4}{3} \pi R_{\max}^3 P_0. \quad (4.2)$$

Є декілька шляхів можливого збільшення ступеня концентрації енергії в газовій бульбашці до яких відноситься і метод ударного стиснення [41, 50, 270]. Перевагою за думкою прихильників такого методу є те, що амплітуда ударного імпульсу тиску може досягати тисяч атмосфер, що є значно більшим, ніж про реалізації гармонійної дії ультразвуковою кавітацією [41, 50]. Акустичний імпульс (рис. 4.1), реалізований в роботі за наступною залежністю зміни тиску: $p = p_0 \sin [2\pi f (t - t_c)] \exp [-(\pi h f)^2 (t - t_c)^2]$, $f = 1 \text{ МГц}$, $t_c = 3/f$, $h = 1/3$ [270].

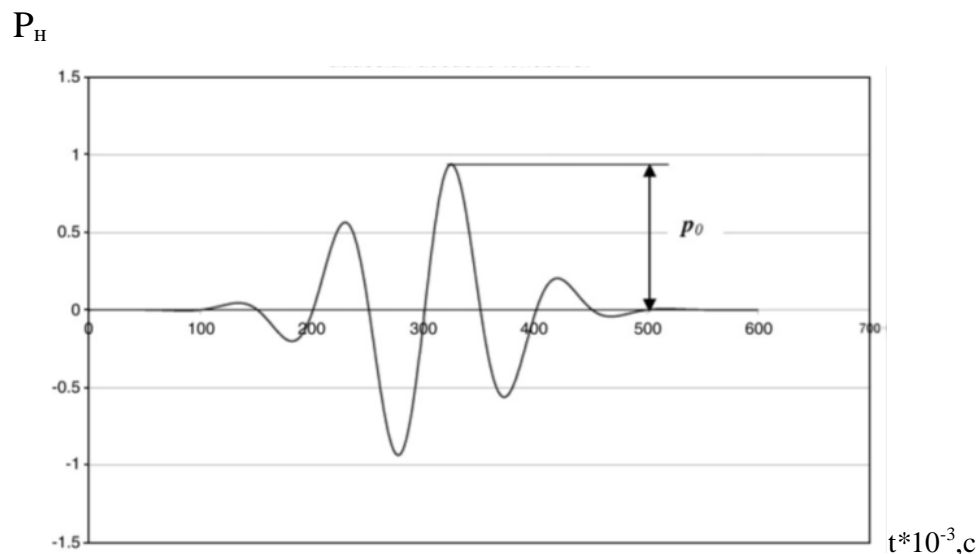
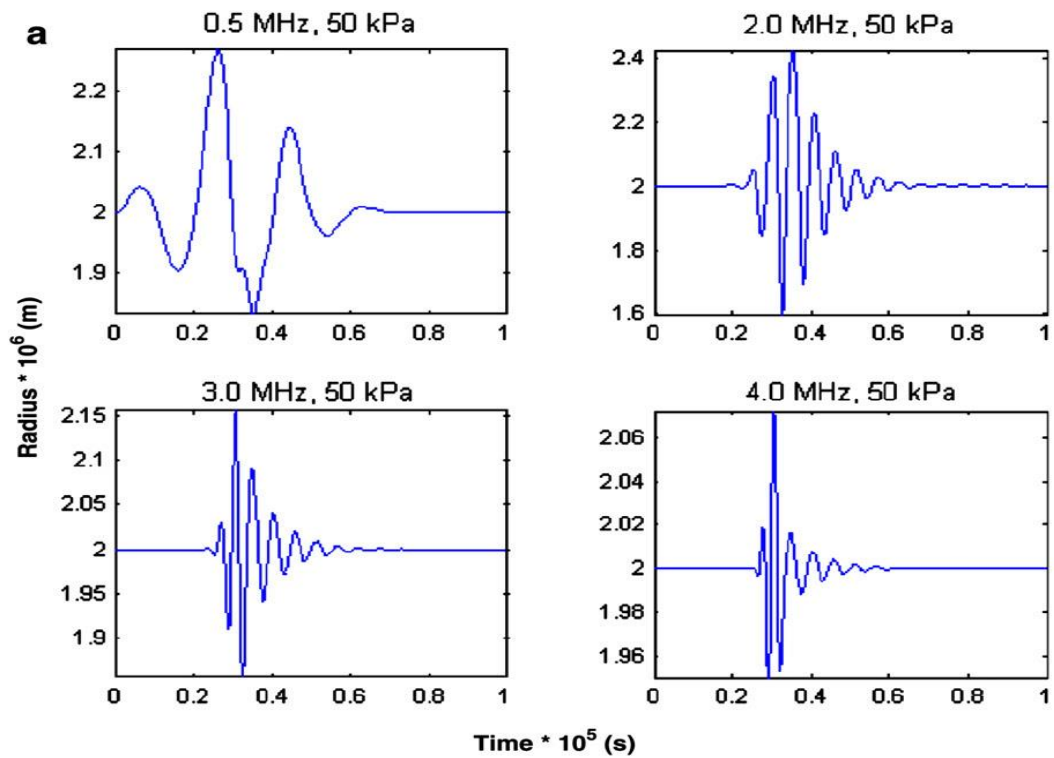


Рисунок 4.1 – Зміна гаусовського акустичного імпульсу у часі за нормалізованого значення тиску

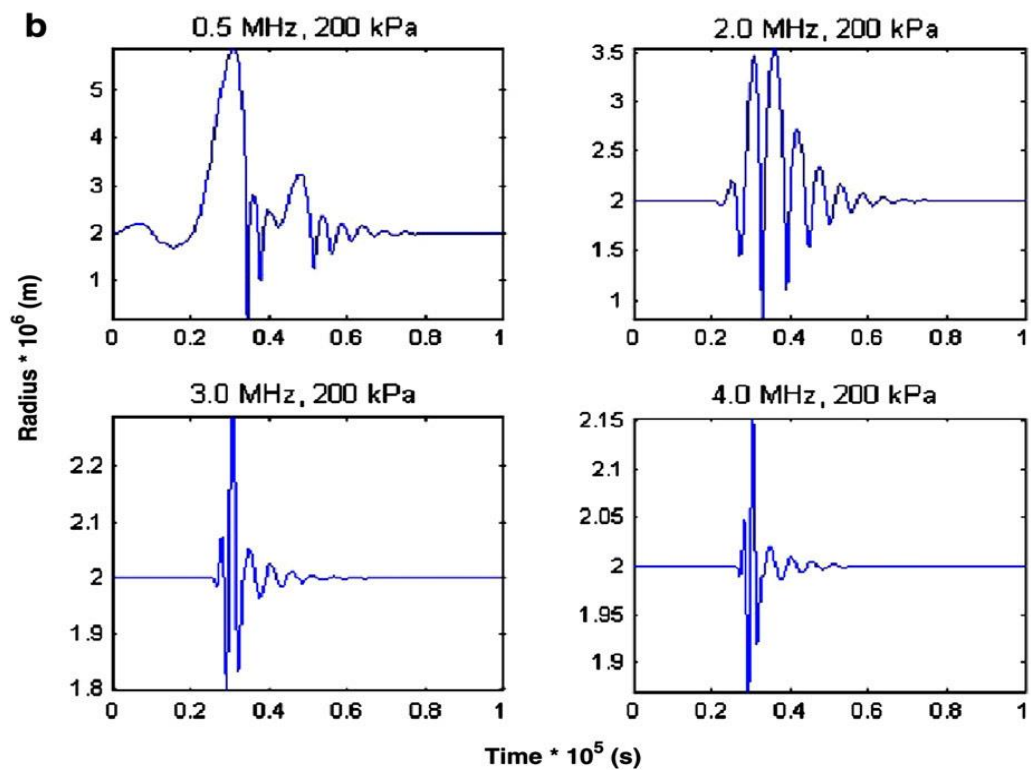
Вважається [41], що за таким методом не існує фази розширення бульбашки, а значить, випаровування рідини в середину бульбашки не грає ніякої ролі. В повній мірі таке твердження потребує аргументації, тому що кавітаційний процес протікає неоднаково у часі для всього ансамблю

бульбашок, адже є усталене свідчення [51, 55, 64] про наявність довго живучих бульбашок. Наявність таких бульбашок і є свідченням необхідності врахування часу та форми імпульсу. Нижче (див. п. 4.) буде показано, що окрім силової складової імпульсу сили, важливим фактором є час дії і ми можемо отримати однакову енергію за різних значеннях сили і часу. Отже, важливим фактором ефективності протікання процесу із представлення енергетики, є швидкість зміни дії силових параметрів у часі. Отримані в роботі [270] характерні сигнали (рис. 4.2) для різних значень тиску і частоти також засвідчують велику різницю в формі та числових значень акустичного імпульсу.

Вивченню спектру присвячені роботи [272 – 275]. Графіки імпульсу побудовані для початкового радіусу рівноваги бульбашки, який становить 2 мкм. Якщо взяти числові значення для характерних при кавітації максимальних розмірах бульбашки і величини тиску [41, 276] $R_{\max} = 100 \text{ мкм}$, і $p_0 = 0.1 \text{ МПа}$, то отримаємо значення для енергії: $E = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$. При стисненні такої бульбашки до $R_{\min} = 0.1 \text{ мкм}$ щільність енергії складе 10 Дж/м^3 , що при адіабатичному нагріванні ідеального газу відповідає температурі більше 45000 К . З урахуванням того, що при звичайних для ультразвукової кавітації інтенсивностях звукових хвиль близько $I = 50\text{--}100 \text{ Вт/см}^2$, що відповідає щільності акустичної енергії порядку $B = I/c = 500 \text{ Дж/м}^3$, значення кумуляції енергії складатиме $2 \cdot 10^{12}$ [276]. Температура в бульбашці може досягати щонайменше 20 тисяч градусів [278–282]. Можливість утворення ударної хвилі в газі відмічається в роботах [284–286, 292]. З іншого боку, результати багатьох робіт не підтверджують утворення ударної хвилі в бульбашці. Наприклад, в статті [288] показано, що ударна хвиля формується лише в деяких спеціально підібраних умовах, які забезпечують дуже високі прискорення стінки бульбашки. Тим ж автором пропонується для цієї мети використовувати додатковий високочастотний імпульс тиску, що прикладається в момент, близький до моменту максимального стиснення бульбашки [250].



a



б

а – пікова амплітуда акустичного тиску $p_0 = 50$ кПа;

б – пікове значення тиску $p_0 = 200$ кПа

Рисунок 4.2 – Зміна акустичного імпульсу у часі за різних числових значень тиску

В цілому ряді інших робіт [290, 291] автори взагалі заперечують наявність якогось ні було ефекту від ударної хвилі в газі або вважають цей ефект дуже незначним [293]. Тому виникає ідея намагатися врахувати зміну властивостей технологічного середовища у часі протікання процесу кавітації. Винятком є наша робота [31], де враховується зміна властивостей технологічного середовища у часі протікання процесу кавітації. В роботі [246] за допомогою комп'ютерного експерименту вдалося змоделювати рух кожної з 106 частинок газу в сферичній бульбашці. За даними цієї роботи підтверджується наявність ударної хвилі, а максимальні температури досягають 50000 K для аргону і 500 000 K для ксенону. Автори роботи [287] відзначають, що для стандартного термодинамічного аналізу число часток недостатньо, проте потужність сучасних комп'ютерів не дозволяє збільшити їх число хоча б на порядок. Таким чином, питання про ударно-хвильової природи ефектів кавітації в даний час продовжує залишатися відкритим.

Незважаючи на те, що експериментальне отримання високоенергетичних кавітаційних ефектів доказано [255, 257, 266, 277 – 283], до теперішнього часу не створено повністю адекватної фізичної моделі процесів, що супроводжують пульсації кавітаційної бульбашки. Труднощі інтерпретації багато в чому пов'язані з надзвичайно широким діапазоном змін у часі об'єму бульбашки, щільності і температури газу, а також малими характерними інтервалами часу (частки наносекунд).

Можна припустити, що в цих умовах практично неможливо описати весь комплекс процесів, що відбуваються в рамках якої-небудь однієї моделі. Так, наприклад, рівняння гідродинаміки стають малопридатними для опису кінцевої стадії стиснення бульбашки, оскільки мінімальний розмір бульбашки близький до розмірів кластерів молекул рідини, і умова суцільності середовища стає неможливою. Незаперечною парадигмою є утвердження [30, 32, 33, 35], що енергетика кавітаційної обробки технологічного середовища обумовлена коректним визначенням енергетичного балансу системи «кавітатор – середовище». Сутність такого визначення полягає в наступному.

Спільним для будь-якого кавітаційного процесу обробки технологічного середовища є те, що зовнішня енергія кавітатора A_k може бути представлена добутком корисної потужності кавітаційного апарату W (кВт) на час її використання dt (с):

$$A_k = kWdt, \quad (4.3)$$

де k — коефіцієнт корисної дії кавітатора.

Для визначення витраченої на протікання кавітаційного процесу енергії, її загальний вираз може бути отриманий на основі уяви фізики процесу, який можна сформулювати таким чином. Добуток питомої енергії E_c (Дж/м³), необхідної для отримання певного об'єму кавітуючого середовища ΔV (м³) матиме вигляд:

$$A_c = E_c \Delta V. \quad (4.4)$$

Рівняння (4.3) є показником енергії, що витрачається на утворення необхідного рівня енергії кавітуючого об'єму технологічного середовища.

Тепер можна записати баланс енергії системи «кавітатор — середовище»:

$$k Wdt = E_c \quad (4.5)$$

Фізична суть параметра E_c полягає у тому, що він і визначає той рівень енергії, який поглинається конкретним середовищем відповідно до підведеного рівня зовнішньої енергії. Цей параметр є якісним показником процесу. Зі зміною стану середовища, а також можливою зміною робочих параметрів акустичного апарату змінюється і показник E_c . Показник об'єму V_k є кількісним показником процесу. Якщо прийняти, що V_k є об'ємом тих кавітаційних бульбашок, що захоплюються, а $V_{д.б.}$ об'єм бульбашок, що не захоплюються (довго живучі бульбашки), то їхнє відношення можна представити як критерій ефективності параметрів акустичної обробки середовища, k_o :

$$k_o = V_{д.б.} / V_k$$

Рівняння енергетичного балансу (4.5) дає можливість записати у загальному вигляді і продуктивність процесу:

$$\Delta\Pi = kW/E_c. \quad (4.6)$$

Із (4.6) випливає, що продуктивність виражає собою співвідношення корисної енергії та енергії, що витрачається на одиницю процесу, тобто це відношення визначає швидкість процесу обробки середовища. Відношення k/E_c у формулі (4.6) визначає рівень ефективності процесу кавітації. Енергія E_c , що витрачається на зародження, розвиток кавітаційних бульбашок, їх сплескування і є оцінкою протікання того чи іншого технологічного процесу обробки технологічного середовища. В роботі [59] відмічається, що характерні розміри парогазової фази, як і її об'єм, суттєво впливають на інтенсивність кавітаційної дії. При цьому спираючись на результати робіт [60, 61] зазначається, що інтенсивність кавітаційного впливу залежить від швидкості кумулятивних мікроструминок, які, в свою чергу, пов'язані з критичними розмірами парогазових бульбашок.

Оцінка енергетичних параметрів кавітаційного процесу, в тому числі розмірів бульбашок, залежить від прийнятої моделі процесу та відповідних рівнянь, що описують ці моделі. Аналіз (див. параграф 1. розд. 1) показав, що найбільше використовується рівняння Релея-Плессета [314]. Рівняння Херрінга-Флінна [308 – 310] враховує стисливість рідини і є більш точним, але тільки до швидкостей руху, порівнянних зі швидкістю звуку в рідині. Якщо на етапі закривання бульбашки швидкість стінки бульбашки перевищує швидкість звуку в рідині, то застосовується рівняння Кирквуда-Бете [311], виведене з допущенням про сферичності хвиль кінцевої амплітуди при сплескуванні бульбашки.

Прийнятий в більшості робіт підхід вдосконалення моделі Релея не дає достовірного, реальному процесу акустичної обробки технологічних середовищ. Обумовлено це необхідністю прийняття апріорних припущень і передумов, напівемпіричних залежностей, які далеко не завжди з достатньою точністю описують процеси, що відбуваються на всіх стадіях від зародження

бульбашок до їх сплескування. Аналіз літератури [87, 110, 116 – 125, 159, 177, 198] показує, що далеко не всі проблеми динаміки кавітаційного пухирця вирішені. Зокрема, одним з основних невирішених питань залишається прийняття допущення про сферичну симетрію процесу стискування бульбашки. Зазвичай розглядаються тільки два фактори, які прийняті в більшості робіт [304, 305] за умови збереження сферичності – це поверхневий натяг і в'язкість.

Виходячи із важливості знання енергетики процесу кавітаційної обробки технологічних середовищ, значна увага приділялася і приділяється вченими, що займаються подібними дослідженнями. Так, наприклад, в роботі [297] кавітаційний режим розпилення рідини враховує наступні складові балансу енергії:

$$E_{к.хв.} = E_{підв} - E_{к} - E_{в.т} - E_{з.с.}, \quad (4.7)$$

де $E_{к.хв.}$ – ультразвукова енергія на збудження стоячої капілярної хвилі на поверхні шару рідини; $E_{к}$ – енергія на утворення кавітаційної зони; $E_{в.т}$ – енергія на подолання в'язкого тертя у шарі рідини; $E_{з.с.}$ – енергія, яка випромінюється з поверхні рідини у газове середовище. Вважаючи поздовжню хвилю деформації в акустичній системі диспергатора плоскою, складові рівняння (4.7) отримано у вигляді [297]:

$$E_{підв} = \frac{1}{2} \frac{S_d h_p (A_k \omega \rho_k)^2 c_k}{\rho_p c_p} ctg^2 \omega t \cdot \cos^2(\omega t - kx);$$

$$E_{к} = \int_0^h N(x, I)(R - R_0)F_n(t, x)dx; \quad (4.8)$$

$$E_{з.с.} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_k c_k^2} p_k^2 \cos^2 \omega t; \quad (4.9)$$

$$E_{з.с.} = \kappa_z (E_{підв} - E_{к}) = \frac{2\rho_z c_z}{\rho_z c_z + \rho_p c_p} (E_{підв} - E_{к}); \quad (4.10)$$

$$E_{краплі} = \frac{16a^2 \sqrt[3]{(\pi\sigma)^5}}{(\sqrt[3]{\rho_p f^2})^2}, \quad (4.11)$$

де $F_n(t, x)$ – результуюча сила, що забезпечує деформацію кавітаційної бульбашки; $N(x, I)$ – кількісний розподіл кавітаційних бульбашок в рідині; P_m – амплітуда коливального тиску в рідині; A_n – амплітуда коливань випромінюючої поверхні; $\omega = 2\pi f$ – колова частота ультразвукової хвилі; k – хвильове число; ρ_k та C_k – відповідно густина та швидкість звуку в матеріалі концентратора; ρ_p та C_p – відповідно густина та швидкість звуку у рідині, що розпилюється; P_k – амплітуда коливального тиску у хвилі деформації стосовно малого діаметра концентратора; X – відстань від вузла тиску у хвилі деформації; S_∂ – площа випромінюючої поверхні диспергатора; h_p – товщина шару рідини; κ_z – коефіцієнт передачі енергії від рідини до газового середовища; ρ_z та C_z – відповідно густина та швидкість звуку в газовому середовищі.

В роботі [168] здійснено розвиток підходу [297] в частині впливу складових енергетичного балансу, структурна схема якого наведена на рис. 4.3.

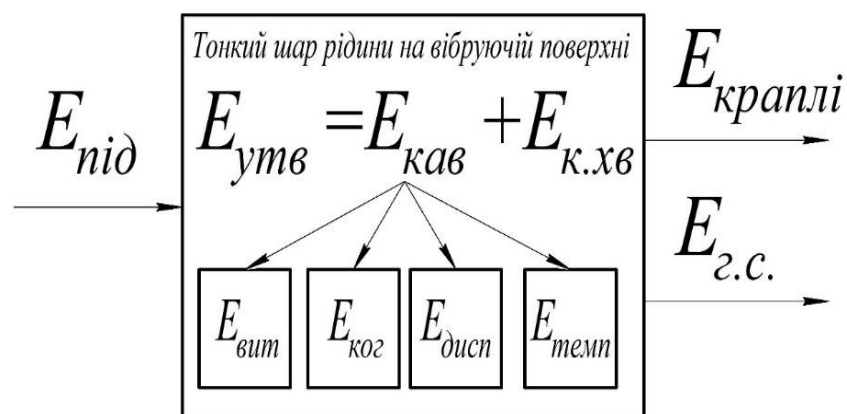


Рисунок 4.3 – Структурна схема складових енергетичного балансу кавітаційного процесу витрачається на утворення і руйнування капілярних хвиль [168]

В загальному вигляді енергія, яка витрачається на утворення і руйнування капілярних хвиль, включає дві складові – енергію на утворення і підтримку кавітації в шарі рідини на вібруючій поверхні ($E_{\text{кав}}$) та енергію на утворення капілярних хвиль ($E_{\text{кхв}}$). Чисельне моделювання капілярно-хвильового режиму розпилення показало [349], що втрати енергії на створення кавітаційної зони при різних вхідних впливах і зовнішніх умовах складають 0,01 – 0,05 % від енергії, що підводиться. При кавітаційному режимі розпилення ці втрати сягають майже 10% [297].

В цілому втрати енергії, пов'язані з утворенням кавітації, призводять до зменшення кількості руху і є причиною виникнення течій еккартового типу та стаціонарних вихрових акустичних течій. Течії еккартового типу характеризуються наявністю стаціонарної безвихрової течії рідини, спрямованої уздовж розповсюдження ультразвукової хвилі. Наявність стаціонарної безвихрової течії обумовлена неоднорідністю звукового поля і визивають перешкоди на шляху звукової хвилі [73, 79, 273]. В роботі [108] зазначається, що при наявності цих течій вплив сил в'язкого тертя на їх рух є малим. Очевидно, що це твердження обумовлене чисельними оцінками тих середовищ, які володіють відносно малими значеннями в'язкості. Аналіз низки робіт [94–104] та результати власних досліджень [16, 23, 41, 45, 54] підтверджують вплив в'язкості на активну складову енергії та суттєво впливають на стадії кавітаційного процесу. Важливим в оцінці енергій, зазначеними формулами (4.1...4.11) є пряма залежність сумарної енергії від інтенсивності сплескування бульбашок та однозначно пов'язана з функціональною залежністю радіусу кавітаційної бульбашки від часу. Ця залежність визначається режимами ультразвукового впливу (частота і амплітуда звукового тиску) і фізичними властивостями оброблюваного середовища, такими як щільність, поверхневий натяг і реологічні властивості (в'язкість). І ключовим моментом розгляду енергетики технологічного процесу необхідно пов'язувати із вихідної енергії.

Тобто енергія, акумулюючись в контактній зоні «кавітатор – оброблювальне середовище», перетерплює кілька стадій перетворення:

- викликаний контактною енергією тиск обумовлює утворення кавітаційних бульбашок у технологічному середовищі з наступним формуванням певного об'єму кавітуючого середовища;
- накопичення енергії кавітаційними бульбашками, викликаючи наступний етап їх розширення;
- стадія сплескування кавітаційних бульбашок, в якій накопичена в бульбашці енергія перетворюється в енергію ударної хвилі;
- енергія ударної хвилі витрачається на утворення на поверхні рідини капілярної хвилі та частково переходить в тепло;
- енергія капілярній хвилі витрачається на збільшення вільної поверхні рідини, тобто на утворення крапель рідини, що і є заключним етапом її оброблення.

Множинне перетворення енергії ультразвукових коливань викликає значні труднощі при встановленні оптимальних режимів обробки. Тому для розробки теоретичних основ використання кавітаційного способу обробки технологічного середовища, визначення раціональних параметрів кавітаційного апарату необхідно визначити та послідовно враховувати етапи перетворення енергії. При цьому особливою областю дослідження процесу кавітаційної обробки технологічних середовищ є визначення якісної та кількісної картини утворення енергії в зоні контакту випромінюючої поверхні кавітаційного апарату і технологічного середовища та умов передачі енергії до технологічного середовища.

Оцінка енергетики в цій області і встановлення таких параметрів, які реалізують оптимальні умови передачі енергії на зародження кавітації в максимальній області середовища, її розвиток і сплескування бульбашок в цій області і є задачею дослідження цього розділу роботи.

4.2 Дослідження енергії обробки технологічного середовища за умови гармонійної дії акустичного апарату

4.2.1 Аналітичне визначення енергії за гармонійним силовим навантаженням

Енергетика кавітаційної області технологічного середовища досліджується на уявленні віброакустичного процесу, як визначення та реалізація цілеспрямованого формування максимальної енергії безпосередньо в контактній зоні. Розглядом хвильового процесу обробки середовища приймається умова визначення енергії обробки технологічного середовища з метою реалізації внутрішнього резонансу системи «кавітатор – середовище». Надалі мають бути гармонізовані фазові коливання поверхні випромінювання кавітаційного апарату і технологічного середовища.

Загальний енергетичний баланс системи A_z "кавітатор- середовище " представляється наступними складовими:

$$A_z = A_{\kappa} + A_{y.\delta} + A_{y.x\theta} + A_m + A, \quad (4.12)$$

де A_{κ} . – робота контактної зони; $A_{y.\delta}$ – робота на утворення кавітаційних бульбашок ; $A_{y.x\theta}$ – робота на утворення ударних хвиль; A_m – робота на підйом температури.

При визначенні енергії, що передається від поверхні випромінювання кавітаційного апарату до технологічного середовища в контактній зоні розглядаються два можливих варіанта їхньої взаємодії:

- реалізуються спільні, тобто безвідривні гармонійні коливання системи "кавітатор – оброблювальне середовище";
- реалізуються негармонійні імпульсні коливання системи "кавітатор – оброблювальне середовище".

За перших умов робота поверхні випромінювання, тобто контактної зони для одного періоду коливань:

$$A_k = \int_0^{2\pi/\omega} F_k \dot{x} \sin \alpha \cos \omega t dt, \quad (4.13)$$

де F_k – контактна сила, що має зсув фази на кут ϕ відносно амплітуди контактної зони; \dot{x} – швидкість коливань контактної зони.

Враховуючи, що сила $F_k = p_k \cdot S$, де p_k – тиск, який в контактній зоні площею S , визначається за формулою [35]:

$$p_k = V_0 \rho \omega \sqrt{\frac{(\sin kl \cos \beta l)^2 - (\cos kl \sin \beta l)^2}{(k^2 + \beta^2)[(\cos kl \cos \beta l)^2 + (\sin kl \sin \beta l)^2]}}. \quad (4.14)$$

Вираз (4.14) під коренем враховує вплив хвильових процесів технологічного середовища на характер та величину тиску. Виділяючи із (4.14) дисипативну складову опору середовища і позначив її через μ після нескладних перетворень з урахуванням (4.14) і (4.13) отримаємо вираз для роботи контактної зони:

$$A_k = \pi m_c x_0^2 \omega^2 \mu, \quad (4.15)$$

де m_c – маса технологічного середовища; x_0 – амплітуда контактної зони; μ – хвильовий коефіцієнт впливу дисипативних сил технологічного середовища на величину контактного тиску.

Тоді середня потужність w_{cp} :

$$W_{cp} = 0,5 m_c x_0^2 \omega^2 \mu.$$

Саме формули (4.15) і (4.16) варто застосовувати для визначення шуканих параметрів загальної роботи і потужності контактної зони.

В роботі [84] застосовано інший підхід визначення роботи на утворення кавітаційних бульбашок та їх розвиток. Робота A_0 , витрачена на утворення кавітаційних бульбашок, дорівнює роботі A_k , яку здійснюють усіма N бульбашками максимального радіуса R_m при їх закритті:

$$A_k = 4\pi(p_0 + \alpha p_m)(R_m^3 - R_{min}^3)N, \quad (4.16)$$

де p_0 і p_m – тиск статичний і максимальний, відповідно; R_m, R_{min} – радіус кавітаційних бульбашок мінімальний і максимальний відповідно; коефіцієнт α враховує величину акустичного тиску, який має місце в момент сплескування

бульбашки. Числове значення коефіцієнта α знаходиться в межах $0 < \alpha < 1$, причому його значення в момент сплескування бульбашки приймається близьким до нуля [84]. Крім того, маючи на увазі, що $R_{min} < R_m$, залежність (4.16) можна записати у вигляді:

$$A_k = \frac{4}{3} \pi R_m^3 p_0 N. \quad (4.17)$$

Сумарний об'єм усіх кавітаційних бульбашок в стадії їх найбільшого розширення ΔV визначається формулою:

$$\Delta V = 4/3 \pi R_m^3 N. \quad (4.18)$$

Тоді співвідношення (4.17) буде мати вигляд:

$$A_k \approx p_0 \Delta V. \quad (4.19)$$

Отже, незалежно від методу, порівнюючи залежність (4.19) отриману в роботі [84] із залежністю (4.2) можна відмітити певну ідентифікацію між ними, в яких об'єм кавітаційних бульбашок ΔV характеризує повноту розвиненості кавітації та її енергетичну спроможність. Іншими словами, ΔV – це активний об'єм в технологічному середовищі, де відбуваються всі кавітаційні явища.

Відмінність залежностей (4.15) і (4.16) від існуючих полягає в тому, що у цитованих роботах використовується поняття приєднаної маси технологічного середовища, що складає її певну частину. Така маса має постійне, тобто незмінне, значення на всіх етапах обробки технологічного середовища і в розрахункових формулах приєднується до маси кавітатора. В дійсності маса середовища не є постійною величиною, оскільки її динамічна дія залежить не тільки від інерційних, а і від пружних і дисипативних властивостей, що і враховується хвильовим коефіцієнтом μ у формулах (4.15) і (4.16).

4.2.2 Результати та аналіз дослідження енергії обробки технологічного середовища за умови гармонійної дії акустичного апарату

Обробкою характерних віброграм (див. рис. 3.11 і 3.12) та частковим використанням числових значень параметрів (див. табл. 3.3) були здійснені розрахунки енергетичних параметрів різних технологічних середовищ (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Числові значення основних параметрів обробки технологічних середовищ

№, п/п	Технологічне середовище	Щільність, кг/м ³	Швидкість розповсюдження хвиль, м/с	Вязкість, 10 ⁻³ *Па/с	Інтенсивність, Вт/см ²
1	Вода	1000	14830	8272	88
2	Трансформа торне масло	900	144530	530	40
3	Моторне масло	980	1740	400	33
4	Смола епоксидна ЄД-5	1700	1170	320	30
5	Гліцерин	1930	1264	59	4
6	Нафта	970	1390	400	30

4.3 Дослідження енергетики процесу обробки технологічного середовища імпульсним навантаженням

4.3.1 Основні аспекти визначення ефективності імпульсного методу обробки технологічних середовищ

Задіяна в дослідженні установка дозволила отримувати імпульси тиску в рідині до 75 МПа і тривалістю в декілька мікросекунд (рис. 4.4).

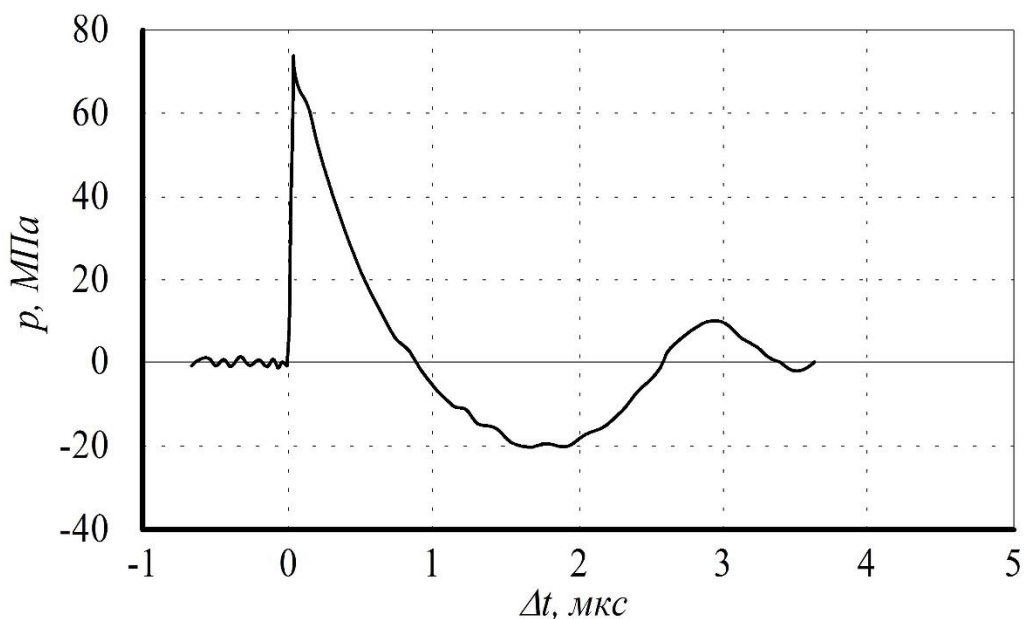


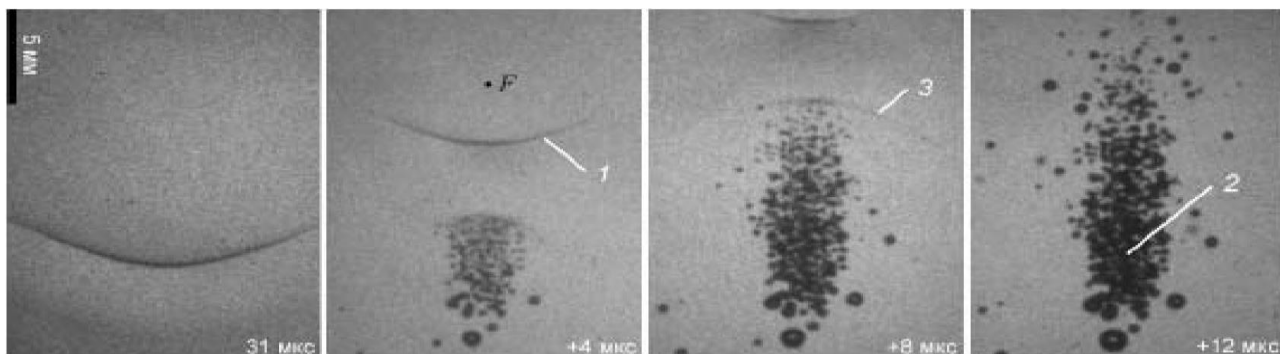
Рисунок 4.4 – Форма і параметри ударно-акустичного імпульсу [276]

Звернемо увагу на ту особливість, що першим йде імпульс стиснення і в той же час, газових бульбашок, здатних до колапсу в цій хвилі, в рідині немає. Лише після інвертування хвилі стискування в хвилю розрідження (наприклад, при відбитті від вільної поверхні рідини) зародки кавітації розширюються і потім колапсують практично до атмосферного тиску.

Другою особливістю даної схеми є мала і практично нерегульована тривалість імпульсу, що не дозволяє отримувати бульбашки із заданим максимальним радіусом. Це створює певні складнощі при вивченні імпульсної кавітації.

Тим не менш, в роботі [301] отримані цікаві результати. На рис. 4.5 показані кадри швидкісної зйомки процесу розвитку кавітаційної зони під дією ударно-акустичного імпульсу.

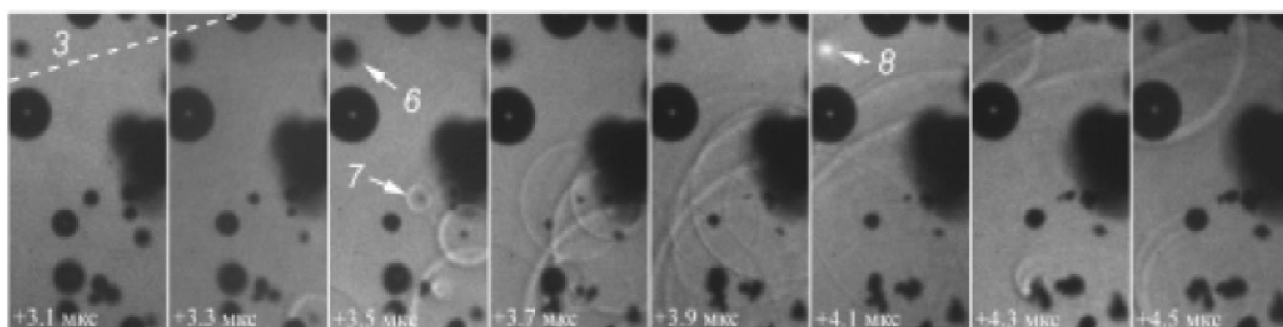
На фотографіях видно, що початок кавітації відповідає за часом імпульсу розрідження, наступним безпосередньо за ударною хвилею (рис. 4.5, фото 2). Після інвертування ударної хвилі (рис. 4.5, фото 3) і проходження її через кавітаційну область, бульбашки досягають максимального радіуса (рис. 4.5, фото 4).



1 – хвиля стиснення, 2 – розвинена кавітаційна область, 3 – хвиля розрідження

Рисунок 4.5 – Мікрофотографії швидкісної зйомки розвитку кавітаційної області [338]

Фотографії процесу стиснення бульбашок в кавітаційній хмарі наведені на рис. 4.6.



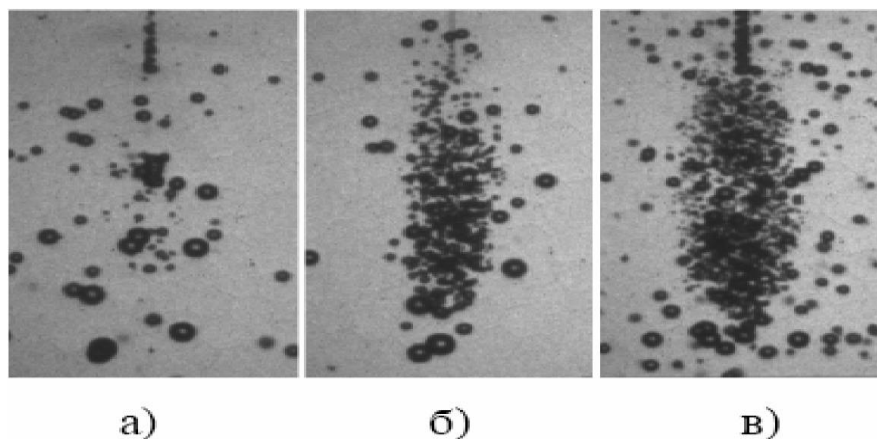
6 – тестова бульбашка, 8 – момент її сплескування, 7 – ударна хвиля в рідині

Рисунок 4.6 – Швидкісна зйомка сплескування кавітаційних бульбашок і ударні хвилів рідині [328]

Добре видно ударні хвилі, що виникають при сплескуванні бульбашок. Слід звернути увагу на неодноразність сплескування бульбашок з різним максимальним радіусом - бульбашки малого радіусу сплескуються досить

швидко, в той час як великі бульбашки практично не змінюють розмірів за час експозиції при зйомці (1,4 мкс).

На рис. 4.7 наведені фотографії кавітаційних областей, що розвиваються при однаковій амплітуді ударно-хвильового імпульсу, але при різній температурі рідини (вода).



а) $t=8^{\circ}\text{C}$, з $[\text{O}_2] = 8.4 \text{ мг/л}$, б) $t=24^{\circ}\text{C}$, з $[\text{O}_2] = 8.6 \text{ мг/л}$,

в) $t=50^{\circ}\text{C}$, з $[\text{O}_2] = 3.4 \text{ мг/л}$

Рисунок 4.7 – Кавітація води за різної температури (розмір кадру $10 \times 17 \text{ мм}^2$), для $P_m = 7,7 \text{ МПа}$ при 42 мкс

Добре видно, що при низькій температурі виникає невелике число бульбашок, які можна вважати поодинокими (а). При зростанні ж температури через великий тиск насичених парів води виникає безліч дрібних бульбашок, взаємно впливають один на одного (в). Це відбувається навіть при меншій концентрації розчиненого газу $[\text{O}_2]$ рідини (при підвищенні температури розчинність газу знижується).

Представляє інтерес розподіл бульбашок по їх максимальним радіусам. На фотографіях рис. 4.5 і рис. 4.7 видно, що є всього кілька бульбашок, які вирости до радіуса $R_{\text{max}} \sim 1 \text{ мм}$, і безліч дуже дрібних бульбашок. Сплескуються, з утворенням ударної хвилі, бульбашки малого радіусу (рис. 4.6) у той час, як великі не сплескуються і просто спливають на поверхню. Очевидно, причина

полягає у малій тривалості імпульсу стиснення за якій бульбашка не встигає сплескуватися, внаслідок наявності у великої бульбашки великої кількості розчиненого газу і пару.

Резюмуючи все сказане можна стверджувати, що ударно-хвильовий метод збудження кавітації представляє великий інтерес з точки зору вивчення можливості посилення кумуляції енергії в бульбашці, насамперед через високі стискаючі тиски, недсяжних при ультразвуковій кавітації.

4.3.2 Аналітичне визначення енергії для обробки технологічного середовища за умов імпульсного навантаження

За умови реалізації імпульсного навантаження (рис. 4.8) поняття амплітуди коливань втрачає своє тлумачення, оскільки режим вже не гармонійний, а імпульсний (асиметричний).

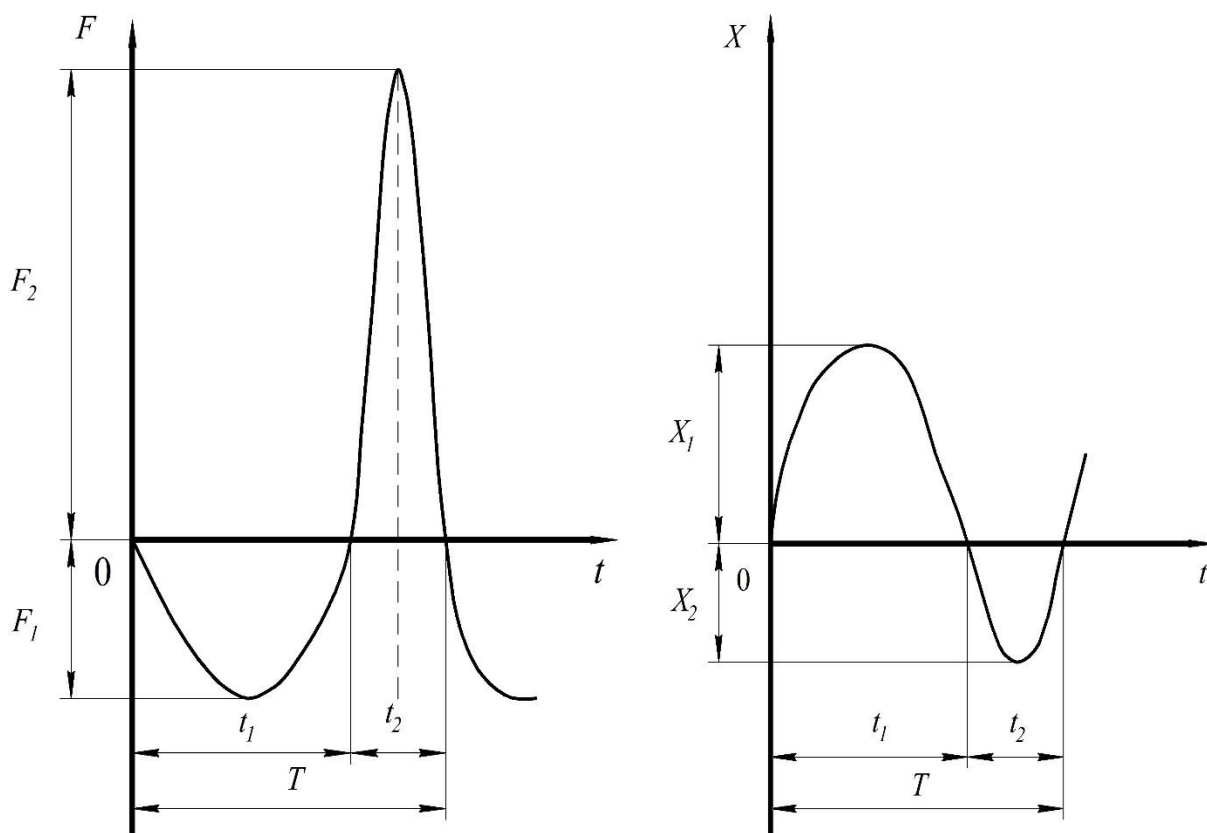


Рисунок 4.8 – Форма зміни сили (F) і переміщення (X) в контактній зоні за умов імпульсної дії кавітаційного апарату на технологічне середовище

За такого режиму застосовується поняття „переміщення” у відповідні відрізки часу: $t_n = t_1 + t_2$, де t_1 – частина періоду при переміщенні X_1 , а t_2 – при X_2 . Позначивши $\alpha = t_1 / t_2$ і $\omega_{cp} = 2\pi / t_n$ – осереднене значення частоти; F_1, F_2 – амплітуди сил. Тоді напруження у відповідні періоди коливань в контактній зоні мають наступний вираз:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_c \sin\left(\frac{\pi t}{t_1}\right), 0 < t \leq t_1; \\ -\sigma_p \sin\left[\frac{\pi(t-t_1)}{T-t_1}\right], t_1 < t \leq T \end{cases} \quad (4.20)$$

Із очевидного співвідношення $\sigma_c \sin(\pi / t_1) = \sigma_p \pi / (T - t_1)$ можна встановити зв'язок між напруженнями стискування технологічного середовища і напруженнями розтягу в зоні реалізації імпульсної зміни сили:

$$\sigma_c = \sigma_p (1 - 2) / \alpha, \quad (4.21)$$

де коефіцієнт α представляє собою асиметрію часу дії:

$$\alpha = t_1 / T. \quad (4.22)$$

Для визначення деформації ε приймемо закон зміни напруження у вигляді:

$$\sigma^*(t) = E \varepsilon^*(t) (1 + i\gamma), \quad (4.23)$$

де E – модуль пружності технологічного середовища у відповідний час його обробки; γ – коефіцієнт опору (дисипації), який визначається за умови:

$$\gamma = 2\pi \Delta W / W, \quad (4.24)$$

де $\Delta W, W$ – енергія розсіювання і потенціальна відповідно; $i = \sqrt{-1}$ – мніма одиниця, що у відповідності до теорії комплексних чисел [272], виражає собою зсув фаз між пружною і непружною (дисипативною) складовими загального опору.

Тоді, використовуючи (4.23) можна записати вираз для зміни деформації за законом:

$$\varepsilon^* = \sigma^*(t) / E(1 + i\gamma) = \sigma^*(t)(1 - i\gamma) / E(1 + i\gamma), \quad (4.25)$$

$$\text{де } \sigma^*(t) = \begin{cases} \sigma_c e^{i\pi/t_1}, 0 < t \leq t_1; \\ -\sigma_p e^{i\pi(t-t_1)/(T-t_1)}, t_1 < t \leq T \end{cases} \quad (4.26)$$

Враховуючи прийнятий закон зміни напружень (4.23) та залежність (4.26) після нескладних перетворень для відповідних часових змін імпульсу сили (див. рис. 4.6) залежність деформації від параметрів набуде наступного вигляду:

$$\text{де } \varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_c \sin(\pi/t_1)}{E(1+i\gamma^2)} - \frac{\gamma\sigma_p \cos(\pi/t_1)}{E(1+i\gamma^2)}, 0 < t \leq t_1; \\ \frac{\gamma\sigma_p \cos[\pi(t-t_1)/(T-t_1)]}{E(1+i\gamma^2)} - \frac{\sigma_c \sin[\pi(t-t_1)/(T-t_1)]}{E(1+i\gamma^2)}, t_1 < t \leq T \end{cases} \quad (4.27)$$

Енергія, що акумулюється в контактній зоні, за умов імпульсного навантаження із урахуванням (4.26) і (4.27) представляє собою добуток напруження (тиску) на швидкість деформації за період T :

$$E_{k.им.} = \int_0^T \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt = \int_0^{t_1} \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt + \int_{t_1}^T \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt. \quad (4.28)$$

Вирішивши (4.28) отримано вираз для енергії:

$$E_{k.им.} = \frac{\pi\sigma_c^2\gamma}{2E(1+\gamma^2)} \left[1 + (1-\alpha)^2 / \alpha^2 \right]. \quad (4.29)$$

Новизна отриманого виразу полягає в тому, що витрати енергії кавітаційного процесу мають дві складові, енергії на хвилі стискування E_{cm} і енергії на хвилі розрідження E_p :

$$E_{cm} = \frac{\pi\sigma_{cm}^2\gamma}{2E(1+\gamma^2)}; \quad (4.30)$$

$$E_p = \frac{\pi\sigma_{cm}^2\gamma}{2E(1+\gamma^2)} \left[(1-\alpha)^2 / \alpha^2 \right].$$

При імпульсі тиску $P(t)$, близькому до прямокутного ($\tau \rightarrow 0$), енергію зовнішніх сил, передану газу в бульбашці, в ідеальній рідині можна прийняти рівною $E = P_m \cdot \Delta V$, де ΔV – зміна об'єму бульбашки. Вважаючи, що амплітуда коливань велика, тобто $R_0 \gg R_{\min}$, можна записати

$$E = \frac{4}{3} \pi R_0^3 P_m. \quad (4.31)$$

Маса газу в бульбашці при заданому рівноважному тиску пропорційна початковому об'єму бульбашки. За таких умов щільність запасеної в бульбашці енергії не залежить від її початкового радіусу [86]. Важливість отриманих залежностей полягає в тому, що є можливим оцінити за числовими значеннями (4.30) ефективність процесу кавітації.

4.4 Обґрунтування та вибір енергетичних критеріїв оцінки процесів кавітаційної обробки технологічних середовищ

4.4.1 Загальні критерії оцінки кавітаційних апаратів для обробки технологічних середовищ

Оцінка кавітаційних апаратів, як власне кажучи, будь якого пристрою, що здійснює той чи інший технологічний процес, за їх загальними та питомими характеристиками визначається низкою критеріїв, які класифікують за певною групою ознак (рис. 4.9).

Функціональні критерії характеризують найважливіші показники реалізації функції кавітаційних апаратів.

Критерії, за якими оцінюють конструкцію апарату, визначають матеріаломісткість та способи зменшення ваги.

Технологічні критерії, пов'язані тільки з можливістю і простотою виготовлення апаратів.

Економічні критерії визначають економічну доцільність тих чи інших методів розробки та створення апарату.



Рисунок. 4.9 – Класифікація критеріїв оцінки апаратів та пристроїв

Антропологічні критерії, пов'язані із забезпеченням низки властивостей: ергономічність, естетичність, безпечність та екологічність.

Для здійснення загального аналізу та оцінки кавітаційних апаратів можна застосувати такі відносні параметри та критерії:

- загальний коефіцієнт корисної дії (ККД);
- продуктивність $\Pi = m/T$ (кг/с) або $\Pi = V/T$ (м³/с) – визначає величину потоку маси кавітуючого середовища або його об'єму за одиницю часу;
- матеріаломісткість $M = G/m$ – показує кількість маси на одиницю перенесеної речовини або енергії;

- енергоємність $E = P/t$ (Вт/кг) або $E = P/V$ (Вт/м³) – визначає кількість потоку енергії на одиницю маси кавітуючого середовища, або кількість потоку енергії на одиницю об'єму кавітуючого середовища;
- ексергетичний ККД, $K_e = E_{ex} / E_{вих}$, де E_{ex} , $E_{вих}$ – ексергія вхідних і вихідних потоків (ексергія – максимальна робота, яку виконує акустичний апарат, взаємодіючи з технологічним середовищем);
- термодинамічний ККД, $K_T = E_g / E_n$, де E_g , E_n – ексергія, що реально використовується і ексергія наявна;
- коефіцієнт використання об'єму $k_v = V_{з.п.} / V_{з.о.}$ – визначає відношення об'єму бульбашок, до вихідного об'єму технологічного середовища;
- ступінь перетворення $k_{пер} = V_{б.} / V_{з.б.}$ – відображає відношення реального об'єму бульбашок, що захоплюлися, до повного об'єму бульбашок, яка може бути отримана за конкретних умов роботи акустичного апарату.
- критерії ефективності дій – це критерії, за допомогою яких оцінюють ефективність в універсальному і синтезованому значеннях, це праксеологічні (практичні) оцінки [321]. Праксеологія відносить результативність не тільки до дій, а й до способу дії. Найбільш результативним є спосіб, що забезпечує найвищу результативність дії.

Для визначення й оцінювання критеріїв згідно з праксеологічним підходом вводять такі основні поняття [321].

Мета дії – бажаний максимальний результат, що з деякої позиції відображає стан технічного об'єкта (або об'єктів), що й визначає напрям і структуру дії суб'єкта, який намагається створити такий результат.

Корисний результат дії – позитивно оцінюваний стан об'єкта, досягнутий в результаті дії. Стан об'єкта, який був досягнутий завдяки дії і є результатом реалізації мети або її частини, називається основним результатом.

Витрати на реалізацію дії – обсяг ресурсів, витрачених на реалізацію дії для досягнення корисного результату.

Терміни «результат» і «основний результат» розрізняють тому, що в праксеології в оцінці результативності не беруть до уваги непередбачені позитивно оцінювані ефекти, які також треба зіставляти з метою. Той факт, що ними нехтують, свідчить перш за все про відсутність прогнозування.

У наведеній структурі понять мета, результат і витрати поєднуються більш загальним поняттям – ефектом дії. Мета – це максимально можливий ефект, який може бути досягнутий, результат – позитивно оцінюваний досягнутий ефект, основний результат – позитивно оцінюваний досягнутий ефект, що не перевищує мети; витрати – негативно оцінюваний ефект. Це дає підставу вважати, що розмірність згаданих величин є однаковою. Позначивши мету як M , результат – як P , основний результат – як P_0 і витрати – як B , вводять праксеологічні показники універсальної ефективності [321].

Якість результату:

$$K_P = P/M . \quad (4.32)$$

Якість результату являє собою відношення результату до мети дії.
Якість основного результату:

$$K_{P_0} = P_0/M . \quad (4.33)$$

Якість основного результату визначає відношення основного результату до мети дії.

Економічність результату:

$$\eta = P/B \quad (4.34)$$

Економічність результату являє собою відношення результату до витрат на реалізацію дії. Якість основного результату K_P є зворотною величиною міри цінності мети, що визначають як «відношення, що передбачає цінності мети (суми цінностей мети) до цінності реального ефекту (суми цінностей реальних ефектів) дії, спрямованої на досягнення даної мети (цілей) дії» [321].

4.4.2 Визначення енергетичних критеріїв для оцінки кавітаційної обробки технологічних середовищ

Енергія E_k накопичена кавітаційними бульбашками при їх сплескуванні перетворюється в енергію стиснення парогазової суміші в бульбашках. При цьому виникають: ударні хвилі, кавітаційний шум, сонолюмінесенція, мікропотоки, хімічні реакції. Ефективність кожного з цих процесів може бути оцінена окремо. Якщо позначити енергію ударних хвиль через E_y , то відношення:

$$\chi = \frac{E_y}{E_k} \quad (4.35)$$

визначає частку потенційної енергії, запасеної кавітаційними бульбашками, яка перейшла в енергію ударних хвиль.

Ексергетичний ККД:

$$K_e = E_{ex} / E_{вих}, \quad (4.36)$$

де E_{ex} , $E_{вих}$ – ексергія вхідних і вихідних потоків (ексергія – максимальна робота, яку виконує система «апарат – середовище»).

В роботі [84] приведено параметр, що визначає щільність енергії $\Delta W_{пит}$:

$$\Delta W_{пит} = A_k / V_k, \quad (4.37)$$

де A_k – робота, яку здійснюють усі бульбашки максимального радіуса R_m при їх сплескуванні.

На рис. 4.10 приведений графік залежності щільності енергії A_k / V_k у функції від $\tau / 0.5T$ [84].

Із приведенного графіка слідує, що максимум відповідає умові $\tau \approx 1/2T$, коли кавітаційні бульбашки встигають закритися за час $1/2T$.

До критеріїв оцінки процесу можна віднести також відношення:

– швидкості акустичного апарату в контактній зоні $V_{k.a}$ до швидкості в середовищі $V_{k.c}$ від процесу зародження бульбашок кавітаційної області до процесу їхнього сплескування:

$$K_v = V_{k.a} / V_{k.c};$$

– часу кавітації τ до характерного періоду ультразвукової хвилі T :

$$K_\tau = \tau/T.$$

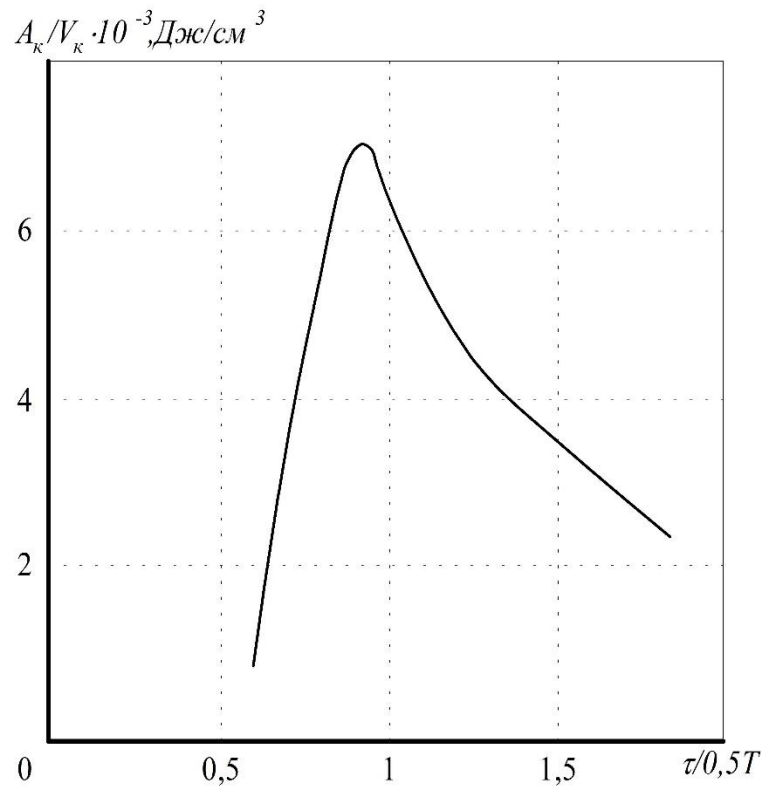


Рисунок 4.10 – Залежність щільності енергії кавітації від відношення часу сплескування кавітаційних бульбашок до напівперіоду звуку

Відношення хвильового опору середовища в режимах кавітації $\rho_k c_k$ до хвильового опору початкового стану середовища, $\rho_c c_c$:

$$k_c = \rho_k c_k / \rho_c c_c. \quad (4.38)$$

Формули для визначення деяких параметрів приведені нижче. Так, амплітуда швидкості визначається за залежністю:

$$v = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}, \quad v = v(\omega, I, \rho, c), \quad (4.39)$$

де I – інтенсивність.

Амплітуда прискорення:

$$a = \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}, \quad a = a(\omega, I, \rho, c). \quad (4.40)$$

На рисунку 4.11 наведені графіки зміни параметрів кавітаційного процесу в залежності від інтенсивності та частоти коливань акустичного апарату, що розраховані для значень (табл. 4.2).

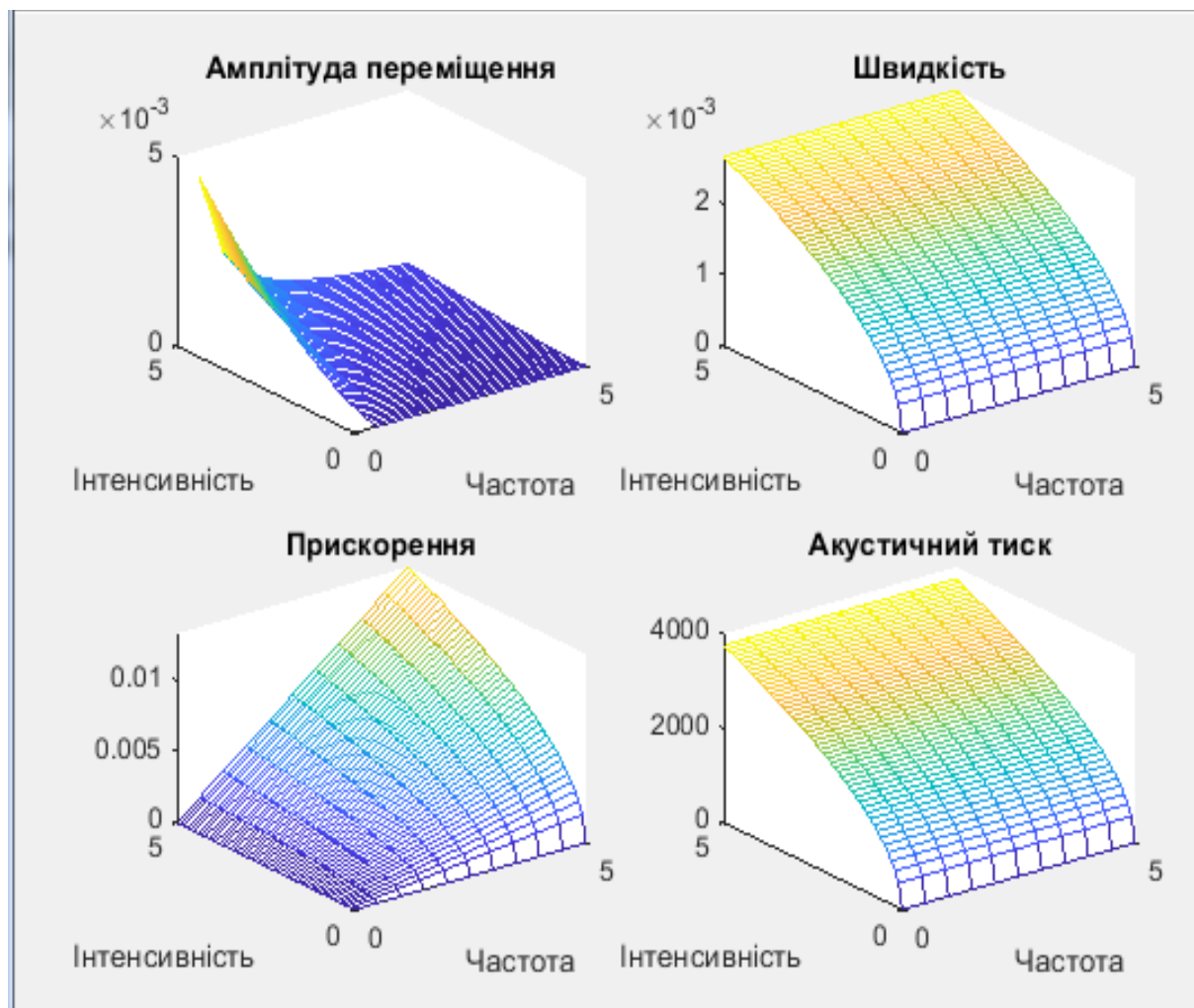


Рисунок 4.11 – Графіки зміни параметрів кавітаційного процесу в залежності від інтенсивності та частоти коливань акустичного апарату

Коефіцієнт корисної дії, як критерій оцінки кавітаційної обробки технологічних середовищ, визнається відношенням питомої енергії E_{num} до загальної енергії:

$$\eta = \bar{E} / E_s, \quad (4.41)$$

$$\text{де } \bar{E} = E_{к.ім} / T = (\sigma_c^2 / 2E) \cdot \pi \gamma / T (1 + \gamma^2) [1 + (1 - \alpha)^2 / \alpha^2].$$

Таблица 4.2 – Вихідні дані для розрахунку параметрів кавітаційного процесу

Входные данные		Расчетные			
c=	1500	скорость распространения упругой	w=	6.28319	угловая
f=	1000000	частот	T=	1e-06	период
lambda=	0.015	длина волны	A=	0.00018	амплитуда смещения частиц в клетке
rho=	936	плотн	vm=	0.11935	амплитуда скорости частиц в клетке
eta=	0.82E-3	вязкос	a=	749914	амплитуда ускорения частиц в клетке
sigma=	73.0E-3	поверхностное	P=	167571	акустическое давление частиц
I=	1E4	интенсивность ультразвуковой			
Dk=	5E-4	диаметр			
Построение					
Диапазон частот		начальное	0	шаг	
		конечное	5		0.5
Диапазон интенсивности волны		начальное	0	шаг	
		конечное	5		0.1
Расчет		Построить граф			

Одним із подальших визначень енергетики кавітаційного процесу є оцінка можливої зміни енергії на всьому технологічному процесі. При цьому важливо визначити енергію на кавітацію бульбашок певного об'єму ΔV . В такому випадку енергію із урахуванням залежностей (4.44), (4.43) і виразу (4.42) можна представити у вигляді:

$$E_{mp} = E_{к.им.} \Delta V t_n / T, \quad (4.42)$$

де t_n – час кавітації бульбашок, що мають об'єм ΔV . Оскільки $E_{к.им.} = f(t_n)$ то її середнє значення $E_{к.им.}^c$:

$$E_{\kappa.i.m.}^c = \frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} f(t) dt, \quad (4.43)$$

де функція $f(t)$ має вигляд:

$$f(t) = E_n e^{-\mu t} E_\kappa, \quad (4.44)$$

де E_n , E_κ – енергія на першій та кінцевій стадіях кавітаційного процесу; μ – коефіцієнт зміни енергії за весь період від зародження, розвитку і сплескування бульбашок:

$$\mu = 1/T(\ln E_0 / E_k). \quad (4.45)$$

Якщо прийняти за умову зміни радіусу середньої бульбашки від $R_0 \rightarrow R_n \rightarrow R_\kappa$, як зменшення на період сплескування і ввести позначення:

$$E_0 / E_k = K_E, \quad (4.46)$$

то, підставляючи (4.45) у (4.43) з урахуванням очевидної зміни функції (4.44), отримаємо вираз для енергії:

$$E = E_0 (K_E - 1) / (K_E \ln K_E). \quad (4.47)$$

Тоді вираз (4.47) підставляючи у (4.43), отримаємо кінцеву формулу для визначення енергії, що витрачається на здійснення процесу кавітації:

$$E_k = [t_n / TE_0 \Delta V (K_E - 1)] / K_E \ln K_E. \quad (4.48)$$

Залежність (4.48) враховує характер і якісну картину зміни узагальненої енергії кавітаційного процесу, як таку, що обумовлена формуванням енергії контактної зони.

Для оптимального вибору робочого середовища з метою реалізації ударного навантаження, в роботі [261] отримано критерій для вибору середовища:

$$c \cdot \rho^{0.5} \rightarrow \max \quad (4.49)$$

З фізичної точки зору критерій (4.49) означає найбільш повну передачу кінетичної енергії рідини газу в бульбашці. За такої умови забезпечуються мінімальні втрати на випромінювання ударної хвилі від бульбашки. Порівняння властивостей різних середовищ наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Порівняння технологічних середовищ за критерієм вибору

Технологічне середовище	Швидкість звуку, м/с	Щільність кг/м ³	ρc^2 , (МДж/м ³)
Ртуть	1453	13600	28,71
Гліцерин	1923	1270	4,70
Сірчана кислота	1440	1830	3,79
Етилен гліколь	1658	1115	3,07
Анілін	1656	1023	2,81
Нітробензол	1460	1200	2,56
Морська вода	1531	1030	2,41
Вода	1484	1000	2,20
Касторове масло	1477	850	1,85
Дисульфід вуглецю	1149	1290	1,70
Бензол	1324	900	1,58
Толуол	1328	866	1,53
Керосин	1324	800	1,40
Чотирехлористий вуглець	920	1595	1,35
Дизельне масло	1250	850	1,33
Етанол	1207	790	1,15
Ацетон	1174	810	1,12
Метанол	1103	792	0,96
Етиловий ефір	985	714	0,69

Як слідує із наведеної таблиці, в'язкість впливає на акумуляцію енергії в газовій бульбашці. Цей результат підтверджує наведені вище (див. розд.3) результати наших досліджень про необхідність врахування в'язкості технологічного середовища.

Дійсно, необхідна інтенсивність ультразвукового впливу в значній мірі визначається в'язкістю середовища і для лінійно -в'язких середовищ з в'язкістю не більше 100 мПа·с становить не більше 10 Вт/см². При переході до більш в'язким рідин (понад 200 мПа·с) необхідні інтенсивності збільшуються.

4.5 Висновки по розділу

1. Здійснені дослідження енергії обробки технологічного середовища за умови гармонійної та імпульсної дії акустичного апарату. Виявлено, що під час кавітації щільність енергії звукового поля трансформується у високу щільність енергії всередині бульбашки.

2. Обґрунтовано загальний підхід до визначення енергії процесу обробки технологічного середовища.

3. Приведені аналітичні залежності для визначення енергії за гармонійним силовим навантаженням, які враховують процеси взаємодії акустичного апарату із технологічним середовищем.

4. Отримані аналітичні залежності (4.15) і (4.16) відрізняються від існуючих врахуванням хвильових явищ технологічного середовища: інерційних, пружних і дисипативних властивостей, що значно підвищує адекватність моделі реальному процесу.

5. Здійснено обґрунтування та отримані аналітичні залежності енергетичних критеріїв для оцінки процесів кавітаційної обробки технологічних середовищ.

6. Виведена залежність (4.48) враховує характер і якісну картину зміни узагальненої енергії на всьому етапі протікання кавітаційного процесу як таку, що обумовлена формуванням енергії контактної зони.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ СИСТЕМИ «КАВІТАТОР - ТЕХНОЛОГІЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ» НА ОСНОВІ СТАДІЙНОГО ВРАХУВАННЯ ДИСКРЕТНОЇ І КОНТИНУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ

5.1 Передумови та припущення

Теоретичним дослідженням кавітаційного процесу динаміки бульбашок, як це було зазначено вище (див. розд. 1 і 2), присвячені роботи дослідників різних напрямків. Для обґрунтування передумов та припущень цього розділу варто звернути увагу на те, що із джерел досліджень, які були визначені пріоритетними і підлягали аналізу, слідує наступне. Більшість робіт направлені на вдосконалення рівняння Релея, опису стадій зародження, розвитку та сплескування бульбашок, визначення параметрів процесу, дослідженню перетворювачів акустичного апарату. Разом з тим, практично зовсім мало робіт розгляду спільного руху системи «кавітатор – технологічне середовище», як системи, що підкорена єдиному віброакустичному процесу. Адже з точки зору хвильової теорії процесів, спільну участь в якому беруть дві практично відмінні за властивостями підсистеми, знехтувати їхньою взаємодією, означає мати недостовірну інформацію. І тому основною передумовою теоретичних досліджень являється гіпотеза, що визначення ефективних режимів і параметрів робочого процесу акустичної обробки технологічного середовища є застосування поетапної перехідної фізичної моделі від дискретного до континуального виду (рис. 5.1).

Передбачається, що за такої схеми математичні рівняння мають з достовірністю для реальних умов, відображати протікання процесів зародження бульбашок, їх розвитку, утворення кавітаційної області бульбашок максимального об'єму та стадії їх сплескування.

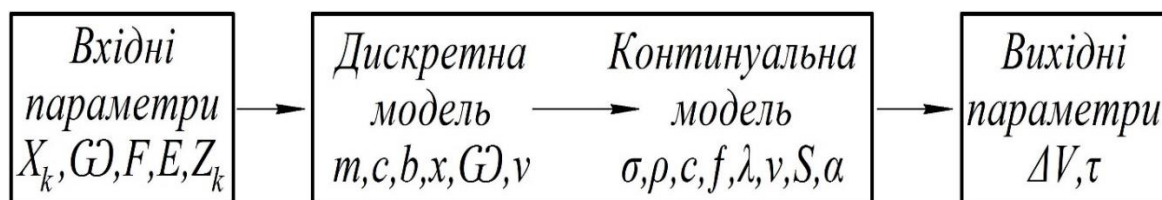


Рисунок 5.1 – Структурна схема моделі, що відображає процес протікання акустичної обробки технологічного середовища

Критеріями реалізації ефективного процесу являються вирази:

$$K_o = \frac{dV}{dt} - > \max;$$

$$K_e = \frac{dE}{dt} - > \min, \quad (5.1)$$

де K_o – критерій об'єму, що являє собою визначення кавітаційної області бульбашок; K_e – критерій енергії, яка витрачається на протікання акустичної обробки технологічного середовища; dV – об'єм кавітаційної області бульбашок, що сплескуються; dE – енергія, яка витрачається на протікання акустичної обробки технологічного середовища; dt – час протікання акустичної обробки технологічного середовища.

Важливим аспектом забезпечення критеріїв (5.1) та формулювань передумов є розгляд протікання стадій процесу кавітаційної обробки у контексті зміни акустичних та реологічних параметрів технологічного середовища.

Перехід від руху одинової бульбашки (дискретна модель) до сплескування їх великої кількості (кавітаційна область, континуальна модель) в описі процесу обумовлено важливістю цієї стадії. Наглядним супроводом поведінки бульбашок може слугувати еволюція рівнів складності формування кавітаційної області (рис. 5.2) [24, 25, 26, 30].

На першому рівні розглядається фізика процесу утворення та визначення залежностей радіусу окремої кавітаційної бульбашки R від часу t , інтенсивність ультразвукових коливань I і реологічних властивостей

середовища, зокрема щільності ρ , коефіцієнта в'язкості ν , модуля пружності E із урахуванням реологічних властивостей, які є лінійно-в'язкі, псевдопластичні і дилатантні:

$$R = f(t, I, \rho, \nu, E)$$

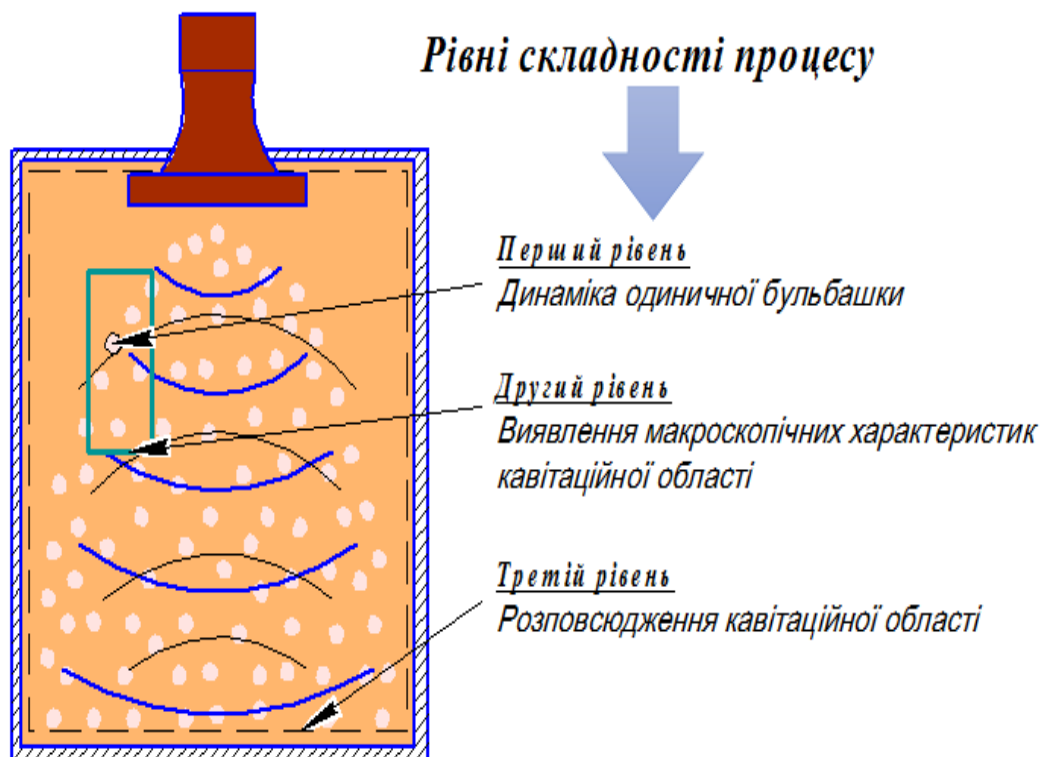


Рисунок 5.2 – Рівні складності формування кавітаційної області

Встановлена залежність радіуса кавітаційної бульбашки є передумовою для визначення середнього рівня деталізації моделі формування кавітаційної області. Реалізацією цього рівня досліджень є аналітичні залежності робіт при певних уточненнях числових значень акустичних параметрів середовищ і апарату. В силу цього встановлюється допустимий діапазон числових значень інтенсивності ультразвукових коливань, в якому реалізується сплескування бульбашок.

Наступною передумовою досліджень є середній рівень (див. рис. 5.2), коли визначається вже сукупність кавітаційних бульбашок в області з

розмірами L , які є меншими за довжину ультразвукової хвилі λ , але є багато більшими за радіус кавітаційної бульбашки R_ϕ :

$$\lambda \gg L \gg R_\phi.$$

Ця умова дає можливість встановити залежність об'ємного вмісту кавітаційних бульбашок V_ϕ та їх концентрації n_ϕ від інтенсивності ультразвукових коливань I , часу t і реологічних властивостей рідини ρ :

$$V_\phi = \frac{4}{3} \pi R^3 n_\phi, \quad (5.2)$$

$$n_\phi = f(t, I, \rho, \nu, E).$$

де R – миттєвий радіус бульбашки, який визначається на нижньому рівні моделі.

На третьому рівні визначається сумарний об'єм і форма кавітаційної області, встановлюється інтенсивність ультразвукової дії, за якою забезпечуються умови інтенсивного режиму розвиненої кавітації, як кінцевого етапу технологічного процесу. Етапи математичної моделі здійснюався за схемою (рис. 5.3).

5.2 Застосування корпускулярної теорії для опису переміщення бульбашки в кавітаційному середовищі

5.2.1 Схема вільного руху одинокої бульбашки

Корпускулярна теорія опису кавітаційного процесу поведінки бульбашки використовувалася для визначення тиску, резонансної частоти та інших параметрів. Схематичне відображення руху бульбашки приведено на рис. 5.4.

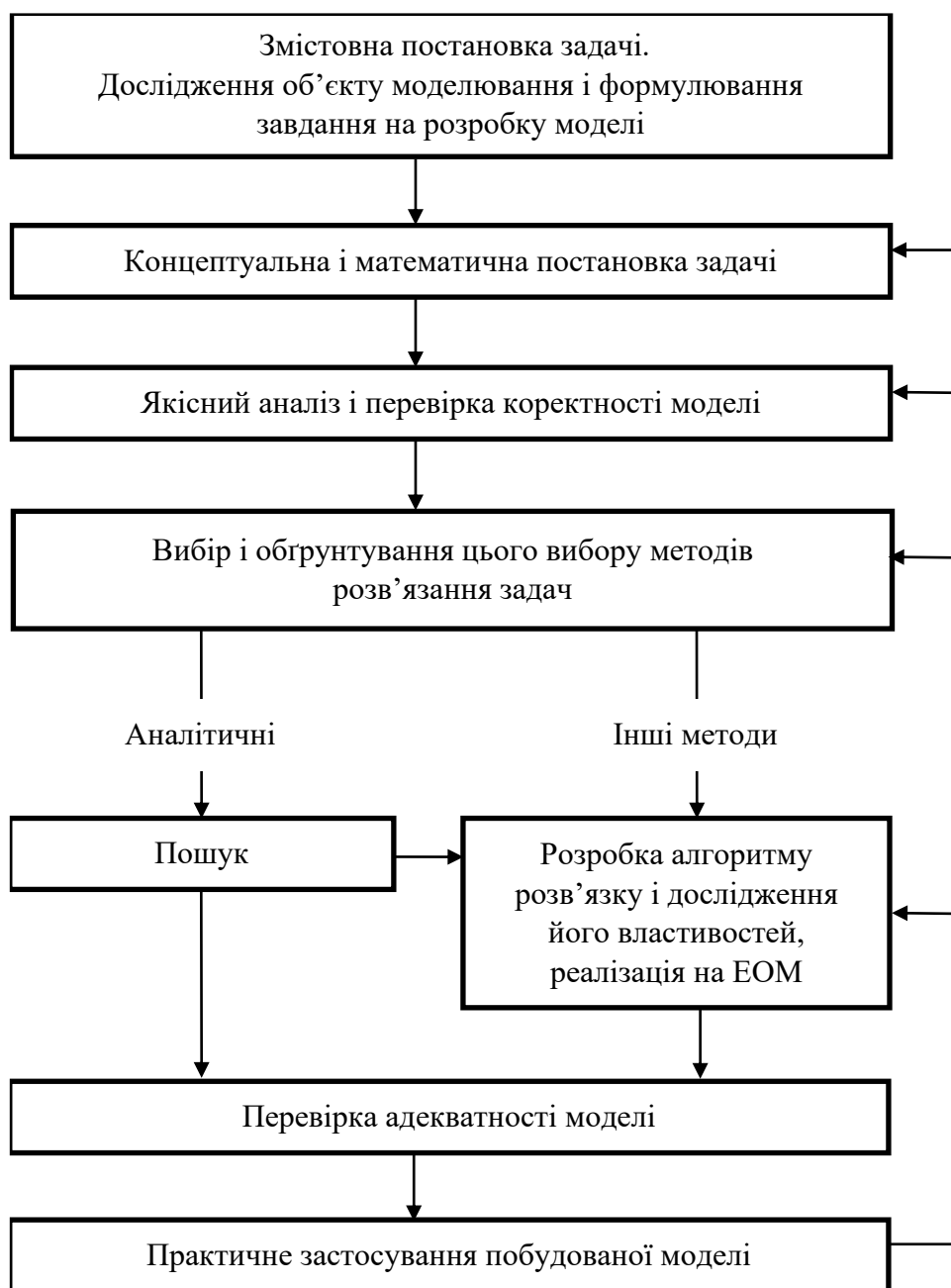


Рисунок 5.3 – Схема побудови математичної моделі: системи
«кавітатор – технологічне середовище»

В наведеній схемі (рис. 5.5) прийняті такі позначення: p_p – тиск в середовищі; $p_{ст}$ – статичний тиск; $p_{кв}$ – звуковий тиск; $p_б$ – внутрішній тиск в кавітаційній бульбашці; $p_г$ – тиск газів; $p_{нт}$ – тиск насичених парів в середовищі; v – швидкість руху оболонки бульбашки до центру.

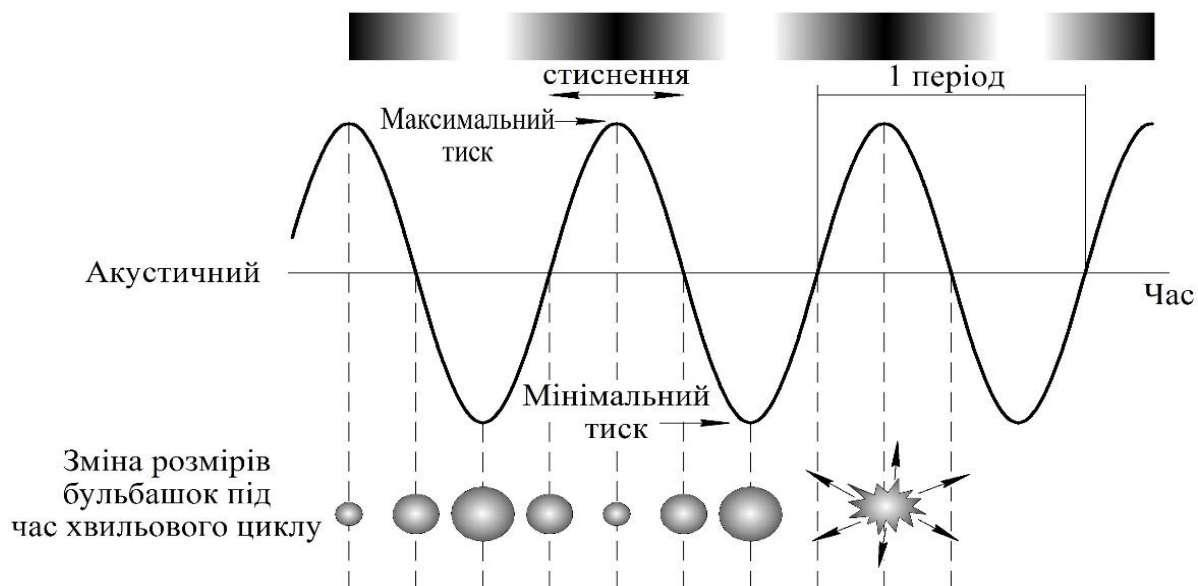
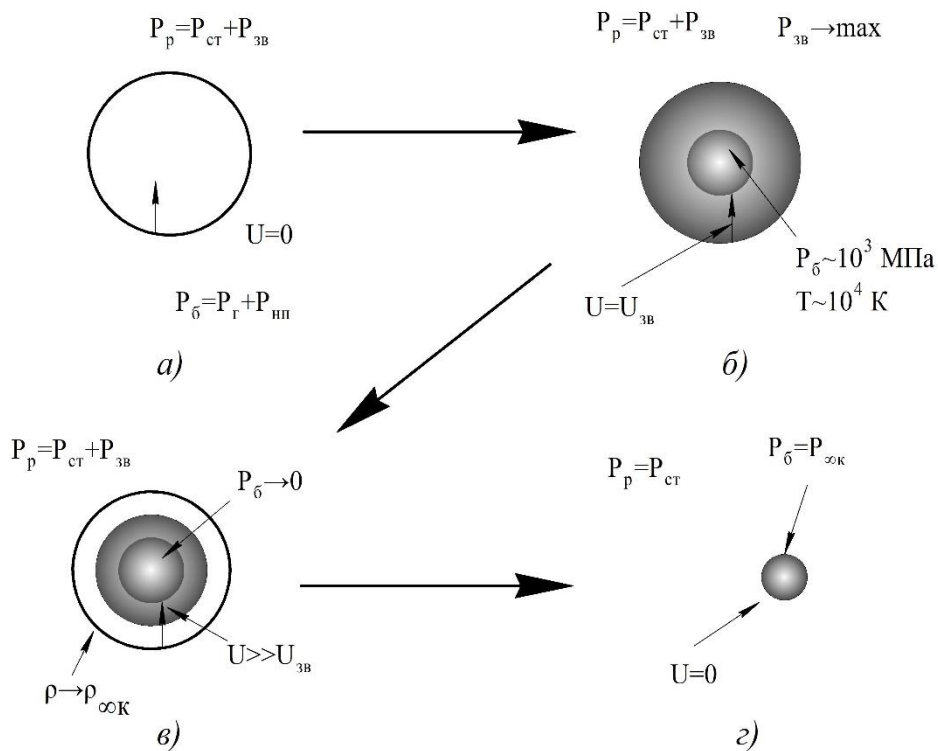


Рисунок 5.4 – Схема руху одинокої бульбашки

На рис. 5.5 наведена схема дії сил на рух одинокої бульбашки на етапах її зародження, розвитку та сплескування.



а – початкова стадія; б – рух з підвищеним прискоренням;
в – рух зі швидкістю, що дорівнює швидкості звуку; г – кінцевий

Рисунок 5.5 – Схема дії сил на рух одинокої бульбашки

У початковій стадії (рис. 5.5, *а*) швидкість оболонки бульбашки стане рівною нулю. З підвищенням тиску в рідині, бульбашка починає рух (рис. 5.5, *б*) у напрямку до центру з підвищеним прискоренням. За рахунок термодинамічних газових процесів в кавітаційній бульбашці підвищуються тиск і температура. Бульбашка на цій стадії запасє кінетичну енергію, достатню для подолання тиску, який виник в кінці другої стадії. Швидкість бульбашки за рахунок підвищення прискорення стає вище швидкості звуку і, внаслідок цього, змінюються умови усередині бульбашки. Вміст бульбашки починає конденсуватися на внутрішній стороні оболонки бульбашки, а тому знижується тиск в бульбашці і оболонка бульбашки може зменшуватися далі. Руху стінки бульбашки у напрямку до центру вже ніщо не перешкоджає, а прискорення стінки постійно підвищується.

Швидкість руху оболонки (рис. 5.5, *в*) бульбашки до центру дорівнює швидкості звуку. Відомо [72], що параметри тиску і температури ($P_b \sim 10^3$ МПа, $T \sim 104^\circ \text{K}$) є кінцевими для процесу сплескування бульбашки. Надалі рух бульбашки до центру закінчується (рис. 5.5, *г*) і вона захлопується. Такий процес руху бульбашки на етапах її зародження, розвитку та сплескування є надто спрощеним.

5.2.2 Схема руху одинокої бульбашки в полі врахування дії сил опору

Тепер розглянемо рух бульбашки при врахуванні сил тертя. При визначенні руху бульбашки в кавітаційному середовищі у якості математичної моделі приймається рівняння:

$$m\ddot{x}_b = m_c \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) (g - \ddot{x}_c) + F_{cp}, \quad (5.3)$$

де m_b – маса бульбашки; m_c – маса середовища в об'ємі, рівному об'єму бульбашок; ρ_b – щільність бульбашки; ρ_c – щільність середовища; \ddot{x}_b – прискорення бульбашки відносно середовища; \ddot{x}_c – прискорення середовища в точці, що збігається з центром ваги бульбашки; g – прискорення сили тяжіння;

F_{cp} – сила, з якою середовище діє на бульбашку.

Рівняння (5.3) описує рух бульбашки за умови зменшення тертя в місцях контакту бульбашок між собою. Бульбашка під дією гравітаційних сил, звільнившись від тертя, займають вільне місце. Вважаємо, що на початковому етапі переважають сили сухого тертя. На кінцевому етапі переважають сили в'язкого тертя. Виходячи з цього, сила F_{cp} , з якою середовище діє на бульбашку, буде визначати сили сухого або в'язкого опору. На першій стадії з сухим тертям між бульбашками сила F_{cp} :

$$F_{cp} = -m_{nn}\ddot{x}_c + F(\dot{x}), \quad (5.4)$$

де m_{nn} – приєднана маса; $F(\dot{x})$ – сила опору відносному руху бульбашки.

$$F(\dot{x}) = 0 \quad \text{при} \quad \dot{x} = 0.$$

Враховуючи (5.4), рівняння руху бульбашки (5.3) прийме вигляд:

$$(m + m_{nn})\ddot{x}_c = m_c((\rho / \rho_0) - 1)(g - \ddot{x}_c) + F(\dot{x}), \quad (5.5)$$

В реальних умовах бульбашка здійснює свій рух по колових траєкторіях в горизонтальній площині. Проекції на осі OX , OY , OZ швидкості бульбашки описуються наступними залежностями (5.5):

$$\dot{x}_{cx} = -A_0\omega\sin(\omega t + \beta); \quad \dot{x}_{cy} = A_0\omega^2\cos(\omega t + \beta); \quad \dot{x}_{cz} = 0, \quad (5.6)$$

де A_0 – амплітуда кругової траєкторії коливань; ω – частота коливань; β – початкова фаза. Оскільки найбільш ефективним прийомом є відносна оцінка процесу, визначимо співвідношення сил опору. Приймаємо: F_{on} – модуль сили опору при русі в горизонтальному положенні; $F_{вер}$ – модуль сили опору при відносному русі у вертикальному напрямку. Тоді рівняння руху бульбашки в проекціях на рухомі осі координат:

$$\frac{F_{вер}}{m_c g} > \left| \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right| \geq \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m_c A_0 \omega^2}{F_{on}}\right)^2 + \left(\frac{m_c g}{F_0}\right)^2}}. \quad (5.7)$$

Система рівнянь (5.7) має рішення:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{x,0} &= R\omega \cos(\omega t + \beta_f); \\
\dot{x}_{y,0} &= R\omega \sin(\omega t + \beta_f); \\
\omega^2 \dot{x}_{z,0} &= \frac{\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} R\omega;
\end{aligned}
\tag{5.8}$$

де R – радіус бульбашки,

$$\begin{aligned}
R &= A_0 \sqrt{\left[\frac{m_c}{m+m_y} \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \right]^2 - \left[\frac{F_k}{(m+m_y)A_0\omega^2} \right]^2} (1-\delta)^2; \\
\delta &= \frac{m_c \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) g}{F_{\text{вер}}}.
\end{aligned}$$

Рішення рівняння (5.8) визначає рух бульбашки по гвинтовій лінії з вертикальною віссю, що має радіус R і крок h :

$$h = \dot{x}_{cz0} \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} R. \tag{5.9}$$

Аналіз отриманих залежностей засвідчує можливість оцінити процес рух бульбашки в середовищі. Практичне значення отриманих результатів (5.3) – (5.9) полягає у визначенні параметрів, що дозволяє оцінити швидкість бульбашки. При цьому вертикальна складова швидкості бульбашки визначається за залежністю:

$$\dot{x}_{cz0} = \frac{\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} R\omega = \frac{m_c \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) g}{F_{\text{вер}}} R\omega \sqrt{\left[\frac{m_c \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)}{(m+m_{nn})\sqrt{1-\delta^2}} \right]^2 - \left[\frac{F_k}{(m+m_{nn})A_0\omega^2} \right]^2}. \tag{5.10}$$

При малих числах Рейнольдса, Re вертикальна складова швидкості:

$$\dot{x}_{cz0} = \frac{m_c \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) g}{3\pi\eta^* d}, \tag{5.11}$$

де η^* – коефіцієнт в'язкості середовища; d – діаметр бульбашки.

Тоді ефективний коефіцієнт в'язкості середовища:

$$\eta^* = \frac{F_c}{3\pi d A_0 \omega} \sqrt{\left[\frac{m_c \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)}{(m + m_{nn}) \sqrt{1 - \delta^2}} \right]^2 - \left[\frac{F_k}{(m + m_{nn}) A_0 \omega^2} \right]^2}. \quad (5.12)$$

Залежність (5.12) розкриває процес насичення бульбашок середовища. Якщо реалізуються вертикально направлені коливання, швидкість занурення частинки визначається за залежністю:

$$x_{z0} = \frac{m_c \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) A_0 \omega}{(m + m_{nn}) \pi} f(x_0, k_a), \quad (5.13)$$

де $f(x_0, k_a)$ – функція, яка враховує співвідношення безрозмірних коефіцієнтів x_0 і k_a , які визначаються за залежностями:

$$x_0 = \frac{F_{\text{сер}}}{m_c \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) A_0 \omega^2}; \quad k_a = \frac{g}{A_0 \omega^2}.$$

Коефіцієнт в'язкості для режимів з вертикальними коливаннями:

$$\eta^* = \frac{(m + m_{nn}) g}{3d A_0 \omega^2} \frac{1}{f(x_0, k_a)}. \quad (5.14)$$

При врахуванні діаметру d та щільності ρ залежність (5.14) перетворюється до виду:

$$\eta^* = \frac{\pi d^2 \rho g}{12 A_0 \omega^2} \frac{1}{f(x_0, k_a)}. \quad (5.15)$$

Аналіз (5.14) і (5.15) засвідчує вплив прискорення на в'язкість. Бульбашки різного діаметру здійснюють коливання з градієнтом швидкостей і певним зсувом фаз.

За умов, що домінує в'язкий опір, на бульбашку в хвильовому полі в'язкого середовища діє сила:

$$F = 6\pi\eta r(1 + r\sqrt{\rho\omega/2\eta})\dot{x}, \quad (5.16)$$

де η – вібров'язкість середовища; r – радіус бульбашки; ρ – густина середовища; ω – частота коливань; \dot{x} – швидкість коливань.

Рівняння руху бульбашки має вигляд:

$$\left[i\omega(m_c - m_{nn}) - 6\pi\eta r(1 + r\sqrt{\rho\omega/2\eta}) \right] (\dot{x}_c - \dot{x}_q) = i\omega(m_c - m_{nn})\dot{x}_q, \quad (5.17)$$

де, як і раніше: m_c – маса середовища в об’ємі, рівному об’єму бульбашки; m_{nn} – приєднана маса бульбашки; \dot{x}_c , \dot{x}_q – швидкість середовища і бульбашки.

Вирішуючи рівняння, отримуємо вираз для відношення швидкості бульбашки до швидкості середовища або відношення їхніх амплітуд:

$$\frac{\dot{x}_q}{\dot{x}_c} = \frac{A_q}{A_{cp}} = \frac{1 + \frac{i}{\Omega} \left(1 + r\sqrt{\frac{\rho\omega}{2\eta}} \right)}{\frac{m + m_{nn}}{m_c + m_{nn}} + \frac{i}{\Omega} \left(1 + r\sqrt{\frac{\rho\omega}{2\eta}} \right)}, \quad (5.18)$$

де $\Omega = \frac{f}{fg} = \frac{f(m_c + m_{nn})}{3\eta r} = \frac{\omega(m_c + m_{nn})}{6\pi\eta r}$, f – частота коливань; fg – характеристична частота.

Для визначення відношення амплітуд коливань бульбашок через параметри середовища визначимо модуль співвідношення (5.18).

Введемо позначення

$$\frac{m + m_{nn}}{m_c + m_{nn}} = k_m, \quad \frac{\Omega}{(1 + r\sqrt{\rho\omega/2\eta})} = k_f.$$

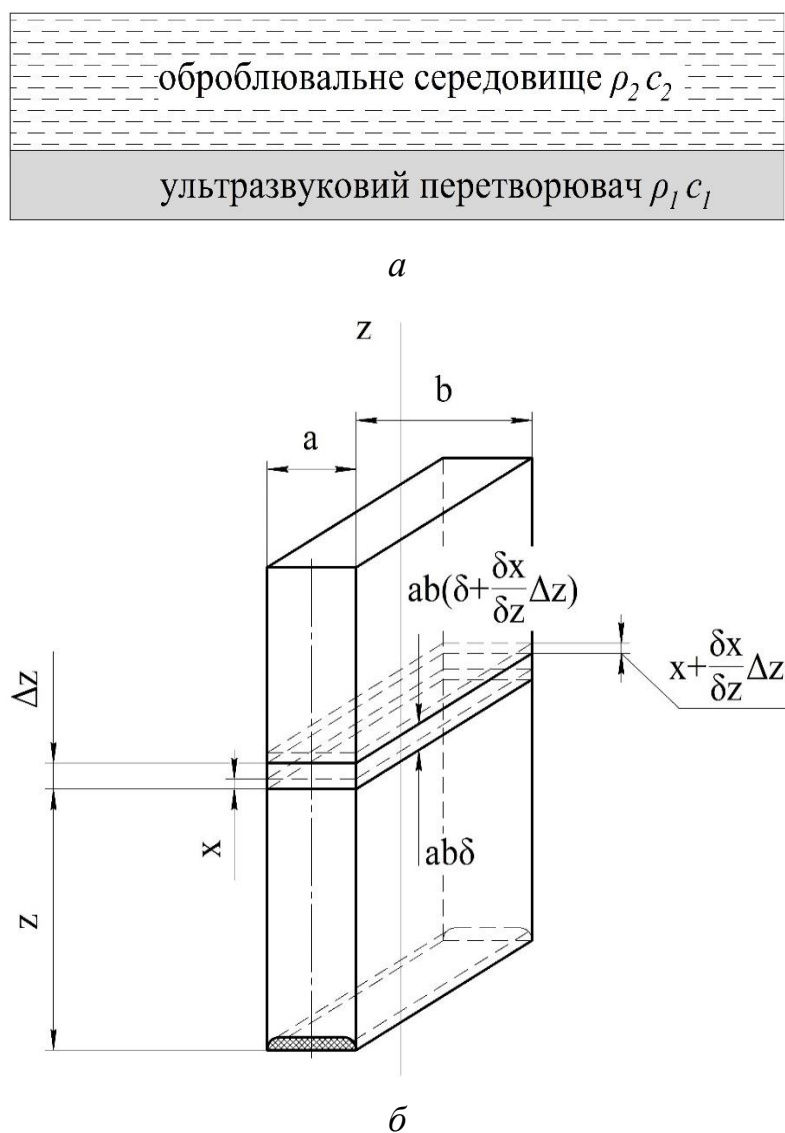
Тоді відношення амплітуд можна виразити так:

$$\begin{aligned} \frac{A_q}{A_{cp}} &= \left| \frac{1 + \frac{i}{k_f}}{k_m + \frac{i}{k_f}} \right| = \frac{1}{k_m^2 k_f^2 + 1} \sqrt{(k_m k_f^2 + 1)^2 + (k_m k_f - k_f^2)^2} = \\ &= \frac{1}{k_m^2 + 1/k_f^2} \sqrt{k_m^2 + \frac{k_m^2}{k_f^2} + \frac{1}{k_f^2} + \frac{1}{k_f^4}}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Отримані залежності (5.6) – (5.19) вказують на необхідність враховувати в оцінці ефективності та швидкодії кавітації умови взаємодії між бульбашками та мати чітке уявлення про ступінь впливу на процес складових тиску, швидкості та співвідношення щільності середовища та бульбашки. Варто зазначити, що для визначення об’єму кавітаційного середовища необхідно враховувати і час дії.

5.3 Застосування континуальної теорії для опису руху бульбашок за розташування поверхні випромінювання акустичного апарата під оброблювальним технологічним середовищем

Розглянемо рух системи «поверхня випромінювання ультразвуковий перетворювач – оброблювальне середовище» (рис. 5.6, а) в якій модель оброблювального технологічного середовища є континуальною (рис. 5.6, б).



а – структурна схема; б – схема континуальної моделі технологічного середовища

Рисунок 5.6 – Розрахункова схема системи «поверхня випромінювання ультразвукового перетворювача – оброблювальне середовище»

За проходження імпульсу шар бульбашок з координатою z_1 зміститься на величину x , а шар з координатою z_2 – на величину:

$$x + \frac{\partial x}{\partial z} \Delta z.$$

Тоді об'єм елемента, який вміщує усі бульбашки, які знаходяться між x_1 та x_2 буде дорівнювати:

$$ab(x_2 + x + \frac{\partial x}{\partial z} \Delta z) - ab(x_1 + x) = ab(1 + \frac{\partial x}{\partial z}) \Delta z = \Delta v + \delta v = \Delta v(1 + \frac{\delta v}{\Delta v}).$$

Величина $\delta v / \Delta v$ представляє собою відносну деформацію середовища. Приймаємо умову збереження суцільності середовища, тобто виконується умова нерозривності у вигляді:

$$\frac{\delta v}{\Delta v} = \frac{\partial x}{\partial z} = -\frac{\delta \rho}{\rho_0}. \quad (5.20)$$

Складемо рівняння руху елемента об'єму Δv від дії імпульсу. Припустимо, що швидкість і градієнт швидкості бульбашок значно менше швидкості звуку, а замість повного прискорення візьмемо тільки локальне прискорення. Складемо рівняння руху елемента об'єму Δv від дії імпульсу. Припустимо, що швидкість і градієнт швидкості бульбашок значно менше швидкості звуку, а замість повного прискорення візьмемо тільки локальне прискорення $\partial x / \partial t = x$. За рахунок переміщення виникає сила інерції, яка викликає силу реакції, рівну $\rho \Delta z ab \frac{\partial x}{\partial t} = \rho ab \Delta z \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$. Сума сил зовнішнього тиску, яка є змінною, на елемент буде дорівнювати:

$$ab\sigma - ab(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial z} \Delta z) = ab \frac{\partial \sigma}{\partial z} \Delta z. \quad (5.21)$$

Закон деформування середовища представляється моделлю Кельвіна-Фойгта:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (5.22)$$

де σ – напруження; ε – відносна деформація елемента; $\varepsilon = \partial x / \partial z$; E – модуль

пружності; η – коефіцієнт в'язких властивостей середовища.

Підставляючи значення (5.22) в (5.21), отримаємо вираз для сумарної сили тиску на елемент Δv :

$$-ab \frac{\partial \sigma}{\partial z} \Delta z = -ab \Delta z \left(\frac{E \partial^2 x}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^2 t}{\partial^2 z \partial t} \right). \quad (5.23)$$

Рівняння руху з урахуванням усіх сил прийме вигляд:

$$\rho a l \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \Delta z - ab \Delta z \left(\frac{E \partial^2 x}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 x}{\partial^2 z \partial t} \right) = 0.$$

Скорочуючи на Δv , отримаємо:

$$\rho \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \left(\frac{E \partial^2 x}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 x}{\partial^2 z \partial t} \right),$$

або

$$\frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^3 x}{\partial^2 z \partial t} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}. \quad (5.24)$$

Рівняння (5.24) є хвильовим рівнянням пружно-в'язкого середовища.

Розглянемо коливання середовища під дією періодичних імпульсів без урахування дисипації. Тоді хвильове рівняння запишеться в наступному вигляді:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}, \quad (5.25)$$

де $c = \sqrt{E/\rho}$ – швидкість поширення коливань; $x(z, t)$ – переміщення в точці z в момент t щодо початкового положення.

Для визначення функції $x(z, t)$ необхідно задати початкові і граничні умови. У початковий момент середовище перебуває в спокої і швидкості дорівнюють нулю. Цю умову можна записати у вигляді :

$$x(z, 0) = 0; \quad x_t(z, 0) = 0. \quad (5.26)$$

Граничні умови в точці $x = H$ визначають відсутність нормальних напружень, так як є умовою вільного кінця:

$$x_x(H, t) = 0. \quad (5.27)$$

Якщо позначити $K_a(t)$ переміщення нижньої грані $z=0$ в момент t , то гранична умова для $x(z, t)$ при $z=0$ буде мати вигляд:

$$x(0, t) = K_a(t). \quad (5.28)$$

Таким чином, ми приходимо до наступної задачі:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}; \quad x(z, 0) = 0; \quad x_t(z, 0) = 0; \quad (5.29)$$

$$x_x(H, t) = 0; \quad x(0, t) = K_a(t).$$

Це завдання вирішуємо методом хвиль, що поширюються. Загальне рішення рівняння (5.25) має вигляд:

$$x(z, t) = f_1(z + ct) + f_2(z - ct),$$

де $f_1(z)$ і $f_2(z)$ – функції, які визначаються з початкових і граничних умов.

При $t < H/c$ рішення (5.29) можна записати у вигляді:

$$x(z, t) = k_a(t - \frac{z}{c}), \quad (5.30)$$

де $k_a(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ k_a(t) & \text{при } t > 0. \end{cases}$

Вираз (5.30) являє собою пряму хвилю імпульсу, що поширюється зі швидкістю c від рухомої межі $z=0$. Легко бачити, що в силу інтерференції хвилі імпульсу на вільному кінці, рішення (30) не задовольняє граничній умові в $z = H$ при $t \geq H/c$. У цій точці $x_x(H, t) = 0$.

Ця гранична умова забезпечує рух хвилі в тій же фазі. При $H/c \leq t < 2H/c$ рішення у вигляді суми двох функцій:

$$x(z, t) = k_a(t - \frac{z}{c}) + k_a(t - \frac{H+z}{c}). \quad (5.31)$$

Рішення (5.31) задовольняє на заданому інтервалі часу $H/c \leq t < 2H/c$ граничній умові. У перерізі $z=H$ при $t \geq 2H/c$ рішення (5.31) вже не задовольняє умові на межі $z = 0$. Обумовлюється це наявністю зворотної хвилі. Тому за умовою $2H/c \leq t < 3H/c$ вирішення задачі представляється у вигляді трьох

функцій:

$$x(z, t) = k_a \left(t - \frac{z}{c} \right) + k_a \left(t - \frac{2H - z}{c} \right) - k_a \left(t - \frac{2H + z}{c} \right). \quad (5.32)$$

Для умови $3H/c \leq t < 4H/c$ отримаємо:

$$x(z, t) = k_a \left(t - \frac{z}{c} \right) + k_a \left(t - \frac{2H - z}{c} \right) - k_a \left(t - \frac{2H + z}{c} \right) - k_a \left(t - \frac{4H - z}{c} \right). \quad (5.33)$$

де $k_a \left(t - \frac{z}{c} \right)$ – пряма хвиля, що йде від рухомої межі; $k_a \left(t - \frac{2H - z}{c} \right)$ – хвиля імпульсу, відбита від межі $z=H$; $-k_a \left(t - \frac{2H + z}{c} \right)$ – хвиля імпульсу, відбита від межі $z=0$; $-k_a \left(t - \frac{4H - z}{c} \right)$ – хвиля, відбита від $z=0$, а потім відбита від межі $z=H$ в тій же фазі. Таким чином, для будь-якого моменту часу t вирішення задачі (5.29) має вигляд:

$$x(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[k_a \left(t - \frac{z + 2nH}{c} \right) - k_a \left(t + \frac{x - 2nH}{c} \right) \right] (-1)^n + k_a \left(t - \frac{z}{c} \right). \quad (5.34)$$

Відповідно, для кожного фіксованого t будемо отримувати деяку кінцеву суму, так як $K_a(t) = 0$ при $t < 0$. Це буде сума переміщень від прямої хвилі імпульсу хвиль, відбитих від межі $x=H$ (вільний кінець) і $z=0$. При відбитті хвилі від нижньої межі відбувається зсув фаз, а відбиття від верхньої межі $z=H$ відбувається в тій же фазі. Цим пояснюється наявність під знаком суми множника (-1) . Наведені залежності справедливі для середовища без врахування дисипації.

Врахування дисипації при проходженні плоских хвиль у в'язко-пружному середовищі призводить до наступної залежності для переміщення в будь-якій точці середовища z в момент часу t :

$$x(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[k_a \left(t - \frac{x + 2nH}{c} \right) e^{-k_f^*(x + 2nH)} - k_a \left(t + \frac{x - 2nH}{c} \right) e^{-k_f^*(2nH - z)} \right] \times \\ \times (-1)^n + k_a \left(t - \frac{x}{c} \right) e^{-k_f^* z}. \quad (5.35)$$

Вираз (5.35) є новою залежністю, яка визначає рух шарів за реалізації

будь-якого режиму обробки технологічного середовища. Для рішення задач з значним згасанням ($n > 1$) вираз (5.35) спрощується до вигляду:

$$x(z, t) = k_a \left(t - \frac{x}{c} \right) e^{-k_f^* z} + k_a \left(t + \frac{x - 2nH}{c} \right) e^{-k_f^* (2nH - z)} \times k_a \left(t - \frac{x + 2nH}{c} \right) e^{-k_f^* (x + 2nH)}. \quad (5.36)$$

Тепер розглянемо врахування сил опору за двома законами зміни розсіювання енергії в технологічному середовищі:

- частотно-залежне розсіювання енергії;
- частотно-незалежне розсіювання енергії.

В першому випадку, це структуровані дисперсні системи з ярко вираженою в'язкістю (олія, масла і т.п.), а в другому випадку, середовища з видимою пластичністю (ряд соків і т.п.)

Рішення рівняння (5.24) представляється функцією:

$$x = x_0 e^{\pm \alpha z + i(\pm kz - \omega t)} \quad , \quad (5.37)$$

де x_0 – амплітуда коливань в зоні контакту кавітатора і середовища; α – коефіцієнт згасання хвилі в середовищі, яке знаходиться під дією акустичного навантаження; x – координата, за напрямком якої розповсюджується хвиля в середовищі; K – хвильове число.

Для випадку гармонійних коливань системи переміщення u по координаті x змінюється за законом:

$$u = u(x) \sin(\omega t). \quad (5.38)$$

Підстановка виразу (5.38) у (5.24) дає диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, рішення якого має вигляд:

$$u(x) = (A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)), \quad (5.39)$$

де A, B – постійні інтегрування, які знаходяться з граничних умов, а \bar{K} – комплексна постійна розповсюдження хвилі, котра з урахуванням впливу в'язкого тертя визначається залежністю:

$$\bar{K} = k - i\beta = \frac{\omega}{c} - i \left(\frac{2\omega^2}{3\rho c^3} \right). \quad (5.40)$$

де $\frac{\omega}{c}$ дійсна частина хвильового коефіцієнта, $a\left(\frac{2\omega^2}{3\rho c^3}\right)$ – виражає явну частину і оцінює вплив розсіяння енергії (дисипацію). Тоді з урахуванням (5.40) вираз для переміщення шару середовища u буде мати вигляд:

$$u = [A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)] \sin(\omega t). \quad (5.41)$$

Диференціюючи вираз (5.41) по часу, отримаємо вираз для коливальної швидкості v :

$$v = \omega [A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)] \cos(\omega t). \quad (5.42)$$

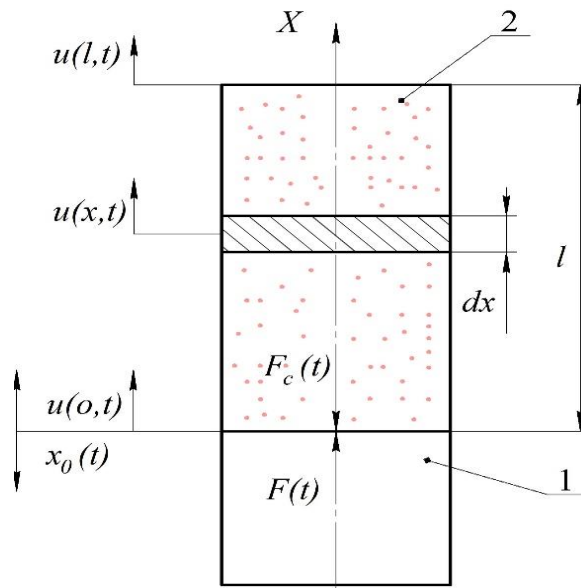
Після диференціювання виразу (5.42) по часу, отримаємо вираз для визначення прискорення a :

$$a = -\omega^2 [A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)] \sin(\omega t). \quad (5.43)$$

Тепер представляється можливим визначити тиск звукової хвилі, $p(x)$:

$$p(x) = -\frac{\rho \omega^2}{\bar{K}} [A \sin(\bar{K}x) - B \cos(\bar{K}x)]. \quad (5.44)$$

Постійні інтегрування A і B визначаємо із початкових і кінцевих умов розповсюдження хвилі в шарі середовища (рис. 5.7).



1 – кавітатор; 2 – технологічне середовище

Рисунок 5.7 – Схема виділеного елемента в середовищі

У якості початкової умови використовуємо значення швидкості коливань поверхні випромінювання в зоні контакту з середовищем. Прийmemo межу розподілу контактної зони системи «перетворювач – шар середовища» за початок відліку. Тоді за умови, що $x=0$:

$$v = v_0. \quad (5.45)$$

За умови, що $x = l$ має місце межа розподілу системи "середовище – газ", на якій, згідно з прийнятими припущеннями, коефіцієнт відбиття хвилі дорівнює одиниці, і так як $\rho c \ll \rho_{\text{впл}} c_{\text{впл}}$, то маємо на межі системи "середовище – газ" вузол звукового тиску. Таким чином, за умови $x = l$:

$$p(x) = 0. \quad (5.46)$$

Підставляючи граничні умови (5.45) і (5.46) в рівняння (5.42) і (5.44), отримуємо вирази для постійних інтегрування A і B :

$$A = \frac{v_0}{\omega}; \quad B = \frac{v_0}{\omega} \frac{\sin(lx)}{\cos(lx)}. \quad (5.47)$$

Тепер є можливість отримати вираз для звукового тиску в шарі середовища в залежності від товщини шару. Для цього граничні умови (5.46) підставляємо в рівняння (5.44):

$$p(x) = \frac{\frac{v_0 \rho \omega}{K} \sin(K(l-x))}{\cos(\bar{K}l)}. \quad (5.48)$$

Із (5.48) слідує, що тиск залежить від швидкості контактної зони, щільності середовища ρ , частоти коливань кавітатора ω , поточного перерізу $l - x$, в якому визначається тиск $p(x)$ та комплексної постійної розповсюдження хвилі \bar{K} , яка, як це слідує із (5.40), залежить від дійсної

частини хвильового коефіцієнта $\frac{\omega}{c}$ та виразу $\left(\frac{2\omega^2}{3\rho c^3} \right)$, що враховує вплив розсіяння енергії (дисипацію) на числове значення тиску. Практичний інтерес представляє значення тиску в контактній зоні, де здійснюється розвиток кавітації в шарі, який безпосередньо межує з випромінюючою поверхнею

ультразвукового апарату ($x = 0$):

$$P = \frac{v_0 \rho v}{K} \operatorname{tg} \bar{K} l, \quad (5.49)$$

або з урахуванням (5.40):

$$P = v_0 \rho c K_{xg}, \quad (5.50)$$

де

$$K_{xg} = \sqrt{\frac{[\sin kl \operatorname{ch} \beta l]^2 - [\cos kl \operatorname{sh} \beta l]^2}{(k^2 + \beta^2) [(\cos kl \operatorname{ch} \beta l)^2 + (\sin kl \operatorname{sh} \beta l)^2]}}, \quad (5.51)$$

Отриманий вираз (5.50) дає можливість визначити амплітуду ультразвукового тиску в залежності від в'язкості і товщини шару середовища для різних рідин. Важливим параметром, що входить в залежність (5.50) є коефіцієнт K_{xg} (5.51), який враховує вплив хвильових процесів, що мають місце в середовищі при його коливаннях.

Для визначення тиску за умови, що має місце для моделі з частотно-незалежним розсіюванням енергії в кавітуючому середовищі, залежність між напруженням σ і деформацією ε приймається в комплексному вигляді:

$$\sigma = E\varepsilon(1 + i\gamma), \quad (5.52)$$

де i – мніма одиниця, яка визначає зсув фаз між пружною складовою $E\varepsilon$ і дисипативною $E\varepsilon\gamma$ на $\pi/2$. Використовуючи розрахункову схему (рис. 5.4) можна зазначити, що до лівої частини виділеного елемента середовища

прикладена сила F , а до правої $F + \frac{\partial F}{\partial x} \partial x$, де $\frac{\partial F}{\partial x}$ – зміна сили на відрізку ∂x .

За умови, що ρ – щільність середовища, отримаємо вираз для визначення маси елемента середовища:

$$m = \rho s \partial x, \quad (5.53)$$

де S – площа перерізу виділеного елемента середовища, яка є рівною площі випромінюючої поверхні акустичного апарату в контактній зоні.

Тоді рівняння сил на вісь X матиме вигляд :

$$-F + (F + \frac{\partial F}{\partial x} \partial x) = \rho s \partial x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (5.54)$$

де $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ – прискорення виділеного елемента середовища.

Оскільки $\frac{\partial F}{\partial x} \partial x = \rho s \partial x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ і якщо врахувати, що деформація елемента $\varepsilon = \partial u / \partial x$ і за умови задачі (рис. 5.4) $s = \text{const}$, отримаємо остаточний вигляд хвильового рівняння коливань середовища по осі X :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 (1 + i\gamma) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (5.55)$$

Відмінність рівняння (5.55) від (5.24) полягає у незалежності дисипативного члена від частоти. Рішення рівняння (5.55) приймається у комплексній формі:

$$u(x, t) = \left[A e^{x(\mu + i\gamma)} + B e^{-x(\mu + i\gamma)} \right] e^{i\omega t}, \quad (5.56)$$

де A і B , які як і у залежності (5.41) постійні інтегрування; коефіцієнти μ і γ – оцінюють вплив дисипації на форму амплітуди коливань і темп її згасання. Процедура визначення коефіцієнтів μ і γ здійснюється шляхом підстановки рішення рівняння (5.56) у (5.55). З цією метою знайдемо часткові похідні рівняння (5.55).

Деформація $\partial u / \partial x$:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = (\mu + i\gamma) \left[A e^{x(\mu + i\gamma)} - B e^{-x(\mu + i\gamma)} \right] e^{i\omega t}. \quad (5.57)$$

Швидкість зміни деформації $\partial^2 u / \partial x^2$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = (\mu + i\gamma)^2 \left[A e^{x(\mu + i\gamma)} + B e^{-x(\mu + i\gamma)} \right] e^{i\omega t}. \quad (5.58)$$

Швидкість переміщення $\partial u / \partial t$:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = i\omega \left[A e^{x(\mu + i\gamma)} + B e^{-x(\mu + i\gamma)} \right] e^{i\omega t}. \quad (5.59)$$

Прискорення $\partial^2 u / \partial t^2$:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 \left[A e^{x(\mu + i\gamma)} + B e^{-x(\mu + i\gamma)} \right] e^{i\omega t}. \quad (5.60)$$

Підстановкою (5.58) і (5.60) в (5.56) отримаємо:

$$(\mu + i\nu)^2 \left[Ae^{x(\mu + i\nu)} - Be^{-x(\mu + i\nu)} \right] e^{i\omega t} = \omega^2 / c^2 (1 + i\gamma) \left[Ae^{x(\mu + i\gamma)} + Be^{-x(\mu + i\gamma)} \right] e^{i\omega t}. \quad (5.61)$$

Рішенням (5.56) будемо мати:

$$(\mu + i\gamma)^2 = -\omega^2 / c^2 (1 + i\gamma). \quad (5.62)$$

Виділимо окремо дійсну та мниму частини залежностей (5.61) і (5.62):

$$\mu^2 - \nu^2 + 2\mu\nu i = -\omega^2 (1 - i\gamma) / c^2 (1 + i\gamma). \quad (5.63)$$

Розділимо праву частину (5.63) на дійсну і мниму:

$$\mu^2 - \nu^2 + 2\mu\nu i = -\omega^2 / c^2 (1 + i\gamma) + i\omega\gamma / c^2 (1 + i\gamma). \quad (5.64)$$

Із (5.64) отримаємо систему залежностей:

$$\begin{aligned} \mu^2 - \nu^2 &= -\omega^2 / c^2 (1 + \gamma^2); \\ 2\mu\nu &= \omega^2 \gamma / c^2 (1 + \gamma^2). \end{aligned} \quad (5.65)$$

Вирішуючи залежності (5.65) спільно, знаходимо вирази для визначення хвильових коефіцієнтів μ і ν :

$$\begin{aligned} \mu &= \bar{\mu} \omega / c; \\ \nu &= \bar{\nu} \omega / c. \end{aligned} \quad (5.66)$$

Тут значення $\bar{\mu}$ і $\bar{\nu}$:

$$\begin{aligned} \bar{\mu} &= \left[(\sqrt{1 + \gamma^2} - 1) / 2(1 + \gamma^2) \right]^{-1/2}; \\ \bar{\nu} &= \left[(\sqrt{1 + \gamma^2} + 1) / 2(1 + \gamma^2) \right]^{-1/2}. \end{aligned} \quad (5.67)$$

Для отримання формули для визначення контактного тиску за моделлю незалежності розсіювання енергії від частоти коливань, необхідно врахувати вираз деформації (5.57):

$$p(t) = E(1 + i\gamma)(\mu + i\gamma) \left[Ae^{x(\mu + i\gamma)} - Be^{-x(\mu + i\gamma)} \right] e^{i\omega t}. \quad (5.68)$$

За аналогією з граничними умовами (5.45) і (5.46) у відповідності до розрахункової схеми «кавітатор – середовище» будемо мати:

за умови $x=0$:

$$u(0, t) = A_0 e^{i\omega t}. \quad (5.69)$$

за умови $x=l$:

$$p(t) = 0 \quad (5.70)$$

Оскільки хвильові коефіцієнти μ і γ визначені вище (див. 5.66) то для контактної зони будемо мати вираз, що подібний до (5.50) з різницею у виразах хвильових коефіцієнтів:

$$p(0, t) = A_0 \omega c \sqrt{\mu^2 + \gamma^2}, \quad (5.71)$$

де μ і γ визначаються за виразами (5.66) з врахуванням (5.67).

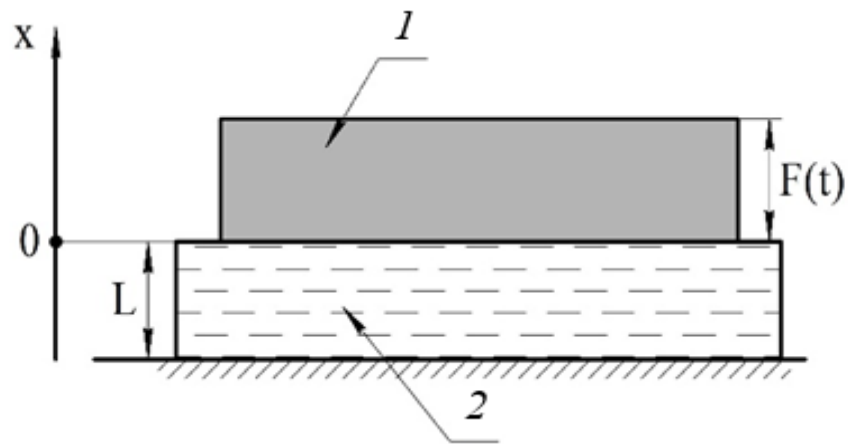
5.4 Застосування континуальної теорії для опису руху бульбашок за розташування поверхні випромінювання акустичного апарата над оброблювальним технологічним середовищем

Аналітичне рішення руху системи «поверхня випромінювання акустичного апарату – середовище» за розташування поверхні випромінювання акустичного апарата 1 над оброблювальним технологічним середовищем 2 (рис. 5.8, а), представлено розрахунковою схемою (рис. 5.8, б).

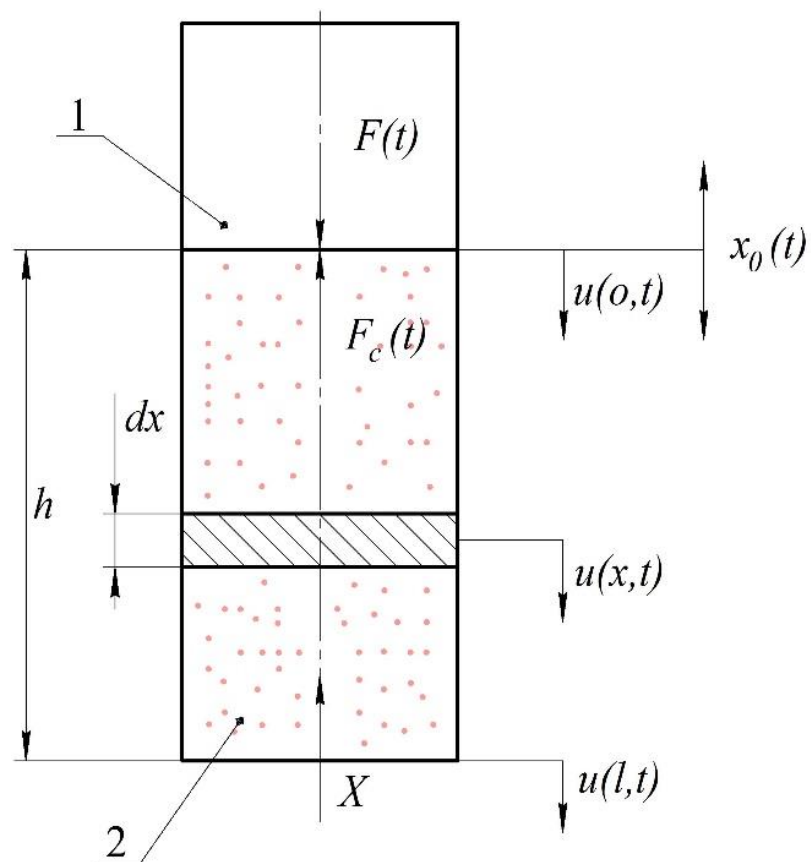
Передумовою є допущення, що акустичний апарат розглядається у вигляді системи з зосередженими параметрами та технологічного середовища, представленого системою з розподіленими параметрами.

Для проведення теоретичних досліджень приймаються такі припущення:

- центри тяжіння всіх шарів лежать на одній прямій, що проходить через центр ваги системи;
- значення модуля пружності і коефіцієнта розсіювання енергії вважаються усередненими в об'ємі оброблюваного середовища;
- процес розглядається на першій стадії, як умова концентрації максимальної енергії;
- коливання контактної зони є спільними.



а



б

h_c – висота технологічного середовища, що підлягає обробці;

X – лагранжева координата; $F(t)$ – контактна сила акустичного апарату;

$X_0(t)$ – амплітуда коливань

Рисунок 5.8 – Система «акустичний апарат – середовище» при розташуванні поверхні випромінювання кавітаційного апарату над оброблювальним технологічним середовищем

Умова спільного руху на першій стадії передачі енергії до середовища кавітатором (відсутність кавітації) має вигляд:

$$\sigma < \frac{Q_T + P_{сц}}{S}, \quad (5.72)$$

де $\sigma_{дин}$ – динамічне напруження в контактній зоні; Q_T – вага сумарної маси коливального середовища і апарату; $P_{сц}$ – сили зчеплення в контактній зоні системи поверхня випромінювання кавітатора – середовище; S – площа поверхні випромінювання акустичного апарату.

Згідно принципу незалежності дії сил при вивченні вертикальних коливань будемо розглядати тільки сили, що діють у вертикальній площині і проектується на вісь X . Рух такого середовища без урахування внутрішнього тертя в ньому описується хвильовим рівнянням:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}. \quad (5.73)$$

Розсіювання енергії в технологічному середовищі, на підставі вихідних передумов, може бути враховано по аналогії (5.52) відповідно до гіпотези про пропорційність розсіювання енергії амплітуди відносної деформації. Повний внутрішній опір при циклічних деформаціях складається з пружного опору, рівного пружній відновлювальній силі, і не пружного, пропорційного пружній відновлювальній силі, але зміщеного по фазі щодо неї на прямий кут. Тоді коефіцієнт опору, що враховує розсіювання енергії має вигляд:

$$\gamma = \psi / 2\psi, \quad (5.74)$$

де ψ – коефіцієнт відносного розсіювання енергії, рівний відношенню поглинання за цикл енергії до повної енергії системи.

Коефіцієнт відносного розсіювання енергії залежить від реологічних параметрів кавітуючого середовища та від інтенсивності динамічного впливу.

З урахуванням розсіювання енергії рівняння (5.79) по аналогії з (5.55) набуде вигляду:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{c(1+i\varphi)} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (5.75)$$

де t – поточний час; U – зміщення поперечних перерізів середовища; x – координата, визначення місця розташування розглянутого перетину.

При $x=0$ зміщення в зоні контакту, амплітуди коливань середовища і поверхні випромінювання апарату є однаковими: $U_1 = A$.

Для вирішення рівняння (5.75) використано метод Фур'є, у відповідності до якого рішення має вигляд:

$$U(x, t) = U_x e^{i\omega t}, \quad (5.76)$$

де

$$U_x = C e^{x(\alpha+i\beta)} + B e^{-x(\alpha+i\beta)}. \quad (5.77)$$

Для визначення α і β знайдемо значення похідних другого порядку:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = (\alpha + i\beta)(C e^{x(\alpha+i\beta)} + B e^{-x(\alpha+i\beta)}); \quad (5.78)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -\omega^2 [C e^{x(\alpha+i\beta)} + B e^{-x(\alpha+i\beta)}]. \quad (5.79)$$

Підставляємо (5.78) і (5.79) в (5.75) і після нескладних перетворень отримаємо:

$$(\alpha + \beta)^2 = -\frac{\omega^2}{c^2(1+i\varphi)}. \quad (5.80)$$

Помноживши чисельник і знаменник правої частини на $^{1+i\varphi/}$, отримаємо залежність для визначення коефіцієнтів у комплексному вигляді:

$$\alpha^2 - \beta^2 + 2\alpha\beta i = -\frac{\omega^2}{C^2(1+\varphi^2)} + i \frac{\omega^2\varphi}{C^2(1-\varphi^2)} \quad (5.81)$$

Надалі, розділяючи умовну і дійсну частини (5.81), отримаємо їхні залежності в явному вигляді:

$$\alpha^2 + \beta^2 = \frac{\omega^2}{C^2(1+\varphi^2)}; \quad 2\alpha\beta = \frac{\omega^2\varphi}{C^2(1-\varphi^2)}. \quad (5.82)$$

Звідки:

$$\alpha = \mu_i \cdot \omega / c ; \quad \beta = v \omega / c , \quad (5.83)$$

де

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{2(1+\gamma^2)}} ; \quad v = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}+1}{2(1+\gamma^2)}} . \quad (5.84)$$

Коефіцієнти μ_1 і v враховують розсіювання енергії в середовищі.

Тепер є можливість вирішити рівняння (5.75). Для цього приймаємо граничні умови в рамках зазначених вище передумов та припущень:

$$x=h; \quad U_{mk} = 0 . \quad (5.85)$$

Тоді з (5.75) отримуємо перше рівняння для визначення коефіцієнтів C і B :

$$C = -B e^{-2h(\alpha+i\beta)} . \quad (5.86)$$

За умови, що в зоні контакту координата $x=0$ (див. рис. 5.7), переміщення кавітуючого середовища і поверхні випромінювання кавітаційного апарату є рівними між собою:

$$U = A = [C + B] e^{i\omega} . \quad (5.87)$$

Друге рівняння для визначення коефіцієнтів C і B отримаємо, розглядаючи умови динамічної рівноваги маси кавітатора M і реакції кавітуючого середовища в зоні їхнього контакту:

$$M \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = F e^{i\omega} + ES [1+i\gamma] \frac{\partial U}{\partial x} + k(Z-U) \quad (5.88)$$

де k - коефіцієнт пружності поверхні випромінювання кавітатора.

Величину Z шукаємо з умови динамічної рівноваги маси кавітатора M :

$$M \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + k(z-A) = 0 \quad (5.89)$$

Так, як амплітуда коливань змінюється за законом $A = A_n e^{i\omega t}$, можемо записати:

$$z + \omega_{ck}^2 z = F , \quad (5.90)$$

де ω_{ck}^2 – власна частота коливань кавітатора за умови врахування коефіцієнта його пружності:

$$\omega_{ck}^2 = \frac{k}{M_e}; \quad F = \frac{(C+B)k}{M_i}.$$

Рішення залежності (5.90) запишемо у вигляді :

$$z = A_1 e^{i\omega t} \quad (5.91)$$

де

$$A_1 = \frac{F}{\omega_{ci}^2 - \omega^2} = \frac{(C+B)\omega_{ci}^2}{\omega_{ci}^2 - \omega^2}. \quad (5.92)$$

Тоді (5.88) перепишеться у вигляді:

$$M \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - ES(1+i\gamma) \frac{\partial U}{\partial x} - k[A_1 - [C+B]] = F e^{i\omega t}, \quad (5.93)$$

де

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} = (\alpha + i\beta)[C-B] e^{i\omega t}; \quad \left. \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right|_{x=0} = -\omega^2 [C+B] e^{i\omega t}. \quad (5.94)$$

Після підстановки в (5.93) виразу A_1 і похідних, отримаємо друге рівняння для визначення коефіцієнтів C і B :

$$-M\omega^2(C+B) - ES(1+i\gamma)(\alpha+i\beta)[C-B] + R(C+B) = F_n, \quad (5.95)$$

де

$$R = \frac{-k\omega^2}{\omega_{ei}^2 - \omega^2}. \quad (5.96)$$

Використовуючи вирази (5.86) та (5.95), знаходимо залежності для коефіцієнтів C та B :

$$C = - \frac{F_a \frac{e^{-h(\alpha+i\beta)}}{e^{h(\alpha+i\beta)}}}{M\omega^2 \left(\frac{e^{-h(\alpha+i\beta)}}{e^{h(\alpha+i\beta)}} \right) + ES \left(\frac{e^{-h(\alpha+i\beta)}}{e^{h(\alpha+i\beta)}} + 1 \right) (1+i\gamma)(\alpha+i\beta) - R \left(\frac{e^{-h(\alpha+i\beta)}}{e^{h(\alpha+i\beta)}} - 1 \right)}; \quad (5.97)$$

$$B = - \frac{F_a}{M\omega^2 \left(\frac{e^{-h(\alpha+i\beta)}}{e^{h(\alpha+i\beta)}} \right) + ES \left(\frac{e^{-h(\alpha+i\beta)}}{e^{h(\alpha+i\beta)}} + 1 \right) (1+i\gamma)(\alpha+i\beta) - R \left(\frac{e^{-h(\alpha+i\beta)}}{e^{h(\alpha+i\beta)}} - 1 \right)}. \quad (5.98)$$

Враховуючи (5.99):

$$E = \rho c^2 ; \quad S = \frac{m}{\rho h} ; \quad (1+i\gamma) = \frac{\omega^2}{c^2(\alpha+i\beta)^2} , \quad (5.99)$$

а також вирази (5.97) і (5.98) та підставляючи їх в загальне рішення (5.77), отримаємо аналітичну залежність для визначення амплітуди зміщення в комплексному вигляді у будь-якому шарі кавітуючого середовища:

$$U_x = \frac{F_a \left[\frac{e^{x(\alpha+i\beta)} \cdot e^{-2h(\alpha+i\beta)} - e^{-x(\alpha+i\beta)}}{e^{-2h(\alpha+i\beta)} - 1} \right] e^{i\omega t}}{-M\omega^2 + \frac{m\omega^2}{h} \cdot \frac{(e^{-2h(\alpha+i\beta)} + 1)}{(e^{-2h(\alpha+i\beta)} - 1)} + R} . \quad (5.100)$$

Для проведення процедури отримання дійсної частини із залежності (5.100) перетворюємо вираз у чисельнику цієї залежності, який знаходиться в квадратних дужках. Враховуючи відомі співвідношення гіперболічних функцій будемо мати:

$$\frac{e^{x(\alpha+i\beta)} \cdot e^{-2h(\alpha+i\beta)} - e^{-x(\alpha+i\beta)}}{e^{-2h(\alpha+i\beta)} - 1} = -\frac{sh(x-h)(\alpha+i\beta)}{sh(\alpha+i\beta)h} . \quad (5.101)$$

Модуль виразу (5.101) запишеться у вигляді:

$$-\frac{sh(x-h)(\alpha+i\beta)}{sh(\alpha+i\beta)h} = -\sqrt{\frac{ch\alpha(x-h) - \cos 2\beta(x-h)}{ch2\alpha h - \cos 2\beta h}} . \quad (5.102)$$

Частина співмножника другого члену в знаменнику (5.100) є виразом гіперболічного котангенса:

$$\frac{(e^{-2h(\alpha+i\beta)} + 1)}{(e^{-2h(\alpha+i\beta)} - 1)} = cth(\alpha+i\beta)h . \quad (5.103)$$

Підставив у співмножник знаменника (5.100) вираз (5.103) і замінивши котангенс його комплексним виразом:

$$\frac{m\omega^2}{h} \cdot \frac{cth(\alpha+i\beta)h}{(\alpha+i\beta)} = \frac{m\omega^2}{h \left[\frac{\alpha \cdot sh2h\alpha + i\beta sh2h\alpha + i\alpha \sin 2h\beta - \beta \sin 2h\beta}{ch2h\alpha + \cos 2h\beta} \right]} . \quad (5.104)$$

Для простоти запису введемо відповідні позначення в (5.104):

$$a = \frac{h(\alpha \operatorname{sh} 2\alpha h - \beta \sin 2\beta h)}{ch 2\alpha h + \cos 2\beta h}; \quad b = \frac{h(\alpha \sin 2\beta h + \beta \operatorname{sh} 2\alpha h)}{ch 2\alpha h + \cos 2\beta h}. \quad (5.105)$$

Тоді

$$\frac{m\omega^2 \operatorname{cth}(\alpha + i\beta)h}{h(\alpha + i\beta)} = \frac{m\omega^2}{h(a + ib)}. \quad (5.106)$$

Позначаючи підкореневий вираз в (5.102) через d , і підставляючи його значення з (5.106) в (5.100), а потім розділивши мниму і дійсну частини, запишемо модуль виразу (5.100) і отримаємо остаточну аналітичну формулу для амплітуди коливань:

$$U_x = \frac{F_o}{|R - M\omega^2|} \sqrt{\frac{(a^2 + b^2)d}{\left[a + \frac{m\omega^2}{|R - M\omega^2|}\right]^2 + b^2}}. \quad (5.107)$$

Вираз (5.107) дозволяє розрахувати амплітуду зсувів вбудь-якому шарі кавітучого середовища. Це важливий результат. Формула показує, що амплітуда коливань не залишається постійною при зміні стадії кавітації. Вона залежить від висоти, на яку розповсюджується кавітація та властивостей середовища, які враховуються коефіцієнтами a і b . Разом з тим, точне визначення амплітуди в кожному конкретному шарі середовища є задачею чисто технологічною того чи іншого виду обробки чи створення нового матеріалу.

Важливим аспектом аналізу отриманих залежностей з точки зору визначення резонансу системи «кавітатор – середовище» в рамках визначених припущень є те, що така система є спільною в динамічному русі у аналізі та синтезі режимів і параметрів.

За умови, що $d=1$ отримаємо вираз для амплітуди коливань поверхні випромінювання кавітатора:

$$A = \frac{A_0}{\frac{m}{M} \frac{1}{\varphi t q \varphi} - \frac{1}{\eta}}, \quad (5.108)$$

де

$$\varphi = \omega / c \cdot h . \quad (5.109)$$

Умови резонансу системи в загальному випадку запишуться у вигляді:

$$\frac{m}{M} = \frac{\varphi t q \varphi}{\eta} . \quad (5.110)$$

За реальних значень висоти h і $\eta = 1$ середовище може розглядатися як дискретна система. Тоді, виходячи з умови резонансу (5.110), можна визначити наближено власну частоту системи, розклавши попередньо $tq\varphi$ в ряд:

$$tq\varphi = \varphi + \frac{1}{3}\varphi^3 + \frac{1}{5}\varphi^5 + \dots . \quad (5.111)$$

Тоді за умов основного резонансу враховуючи (5.111) матимемо для визначення співвідношення (5.109):

$$\varphi = \sqrt{\frac{(\rho Sh) / M}{1 + (\rho Sh) / 3M}} . \quad (5.112)$$

Звідси наближене значення власної частоти системи «кавітатор – середовище»:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{ES}{h(M + (\rho Sh) / 3)}} . \quad (5.113)$$

Як видно, вираз ES/h є жорсткість, а вираз для кавітуючого середовища враховує вплив однієї третини її маси.

Розрахунок амплітуди коливань для такого випадку може проводитися за формулою:

$$A = A_0 \frac{\omega^2}{\omega_{ci}^2 - \omega^2} . \quad (5.114)$$

Для розрахунку динамічного напруження в середовищі, згідно з прийнятою залежністю (5.52), маємо:

$$\sigma_{дин} = E\varepsilon(1 + i\gamma) .$$

З (5.76) отримуємо:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = (\alpha + i\beta)(Ce^{x(\alpha+i\beta)} + Be^{x(\alpha+i\beta)}) \quad (5.115)$$

Підставляючи замість C і B їх вираження і провівши необхідні перетворення, аналогічні тим, що були проведені при виведенні формули амплітуди коливань і з огляду на те, що $E = \rho c^2$, отримаємо вираз, що дозволяє розрахувати динамічний тиск в будь-якому шарі середовища:

$$\sigma = \rho c^2 A \cdot \sqrt{(\alpha^2 + \beta^2) d \cdot d_1}, \quad (5.116)$$

де d_1 - хвильовий коефіцієнт:

$$d_1 = \frac{ch2\alpha(x-h) + \cos 2\beta(x-h)}{ch2\alpha h - \cos 2\beta h} \quad (5.117)$$

При $x=0$ і $d=1$ вираз (5.117) визначає вплив хвильових явищ для контактної зони. Формула (5.116) показує безпосередній зв'язок динамічного тиску на контакті з амплітудою коливань поверхні випромінювання кавітатора. Якщо з (5.116) виразити амплітуду через тиск, то видно, що з ростом контактного напруження амплітуда також зростає. Повне значення тиску із врахуванням статичного впливу можна представити виразом:

$$\sum \sigma_{on} = \sigma_{cm} + \sigma_{дин} \quad (5.118)$$

тут

$$\sigma_{cm} = \frac{M}{S} g + \rho h_1, \quad (5.119)$$

де M – маса поверхні випромінювання кавітатора, що здійснює тиск; h_1 – висота, яка відлічується від контактної зони до точки, в якій визначається тиск.

Таким чином, отримані вирази (5.100 – 5.114) дозволяють розрахувати амплітуду коливань, як в середовищі, так і в контактній зоні, або по заданій амплітуді призначати необхідні параметри кавітаційного процесу. За допомогою вказаних формул представляється можливим визначити зони посилення або ослаблення амплітуди коливань для різних частот коливань, а також розрахувати напруження (5.116) в будь-якому шарі технологічного середовища.

5.5 Результати теоретичних досліджень та їх аналіз

5.5.1 Визначення впливу складових тиску на рух і зміну стану бульбашки на різних стадіях протікання кавітаційного процесу

Зовнішній тиск, що створюється джерелом коливань:

$$p_{зов}(t) = -p_{кв} \sin \omega t + p_{zc} \quad (5.120)$$

Важливим показником тиску є його числове значення, за яким починається процес формування бульбашки. Такий тиск в роботі [54] названий «критичним» (p_K), який визначається за виразом:

$$p_k = -\bar{p}_{кв} + p_{zc}, \quad (5.121)$$

де $p_{кв}$ – середній звуковий тиск кавітатора, що діє на бульбашку в фазі розширення; p_{zc} – гідростатичний тиск.

Значення середнього звукового тиску можна визначити по площі прямокутника, що є рівною площі, обмеженої частиною синусоїди (рис. 5.9) [77].

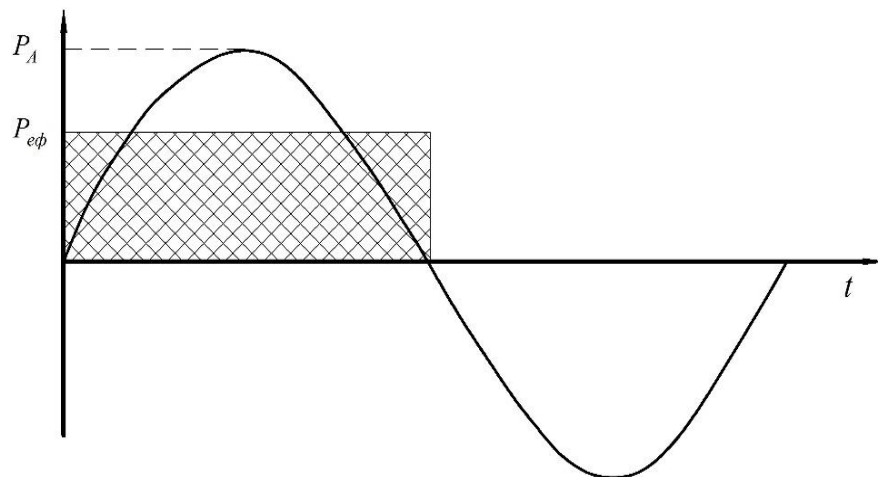


Рисунок 5.9 – Метод графічного визначення середнього звукового тиску за половину періоду

Тоді площа прямокутника:

$$\overline{p}_{KB} = \frac{2p_A}{T} \int_0^T \sin \omega t dt, \quad (5.122)$$

де T – період коливань.

Рішенням інтегралу (5.122) знаходиться частка \overline{p}_A від p_A :

$$\overline{p}_A = 0,7 p_A. \quad (5.123)$$

Беручи до уваги висловлену гіпотезу [35], приймається, що прослідкувати протікання процесів у часі зручно шляхом одночасного розгляду характеру зміни зовнішнього тиску $p_{3в}$ за один період і зміни руху бульбашки за той же період (рис. 5.10).

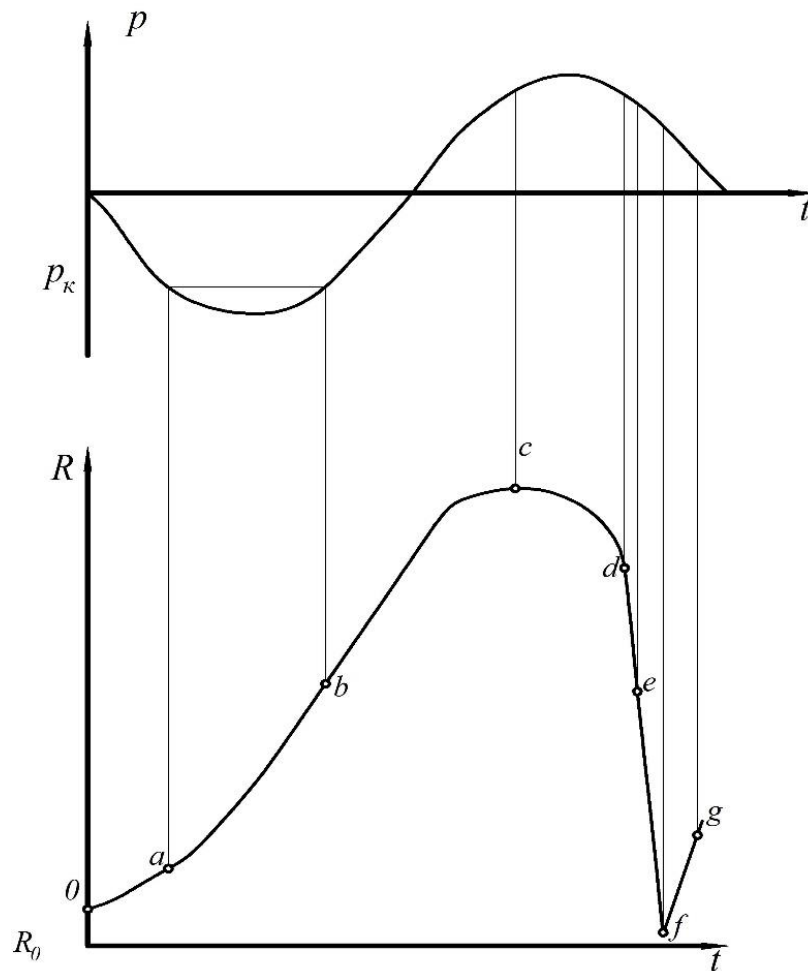


Рисунок 5.10 – Зміна контактного тиску p_{KB} та трансформація розміру кавітаційної бульбашки $R_{\min-\max}$ за один період коливань

Такий підхід використаний в роботі [77]. Однак в нашому випадку на рисунку здійснені деякі уточнення, які полягають у тому, що, внаслідок втрати енергії, в реальному процесі відбувається зсув по фазі між діючою силою і переміщенням бульбашки. Окрім цього, зручніше розглядати процес з оцінки зміни сили і її дії на зміну руху та зміни стану бульбашки, а не навпаки. Перш за все виділимо характерні точки на графіку зміни зовнішнього тиску, що створюється акустичним випромінювачем та розглянемо зміну тиску і рух бульбашки у відповідні стадії процесу ультразвукової обробки технологічного середовища.

1. Відсутність кавітації. За малої амплітуди звукового тиску кавітаційні зародки здійснюють лінійні радіальні коливання на ділянці до точки *a* з незначними амплітудами. Точка *a* в режимі розширення відповідає умові, за якою бульбашка певного розміру втрачає стійкість і може безперешкодно розширюватися під дією тиску парогазової суміші в бульбашці.

2. Зародження кавітації. Саме за значенням p_a (див. 5.10) і визначається точка *a* на кривій руху бульбашки. При подальшому підвищенні амплітуди звукового тиску (наприклад, до 10^5 Па для води або $3 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$ Па для масла [72]) величина амплітуди коливань радіусу бульбашок стає порівнянною з початковим радіусом i , тим самим, порушується лінійність коливань. Нелінійність обумовлена тим, що швидкість зменшення радіуса бульбашки в стадії стиснення виявляється значно вище, ніж швидкість розширення бульбашки в стадії розрідження.

Отримавши можливість рухатися бульбашка переміщається в точку *b*, а потім далі в точку *c*. На відстані руху до точки *c* діючи тиски знаходяться в співвідношенні $p_d > p_s + p_0 + \alpha p_A$, де α – коефіцієнт осередненого тиску на даній ділянці синусоїди. З ростом тиску, за досягнення якого частці періоду $3/4T$, бульбашка, рухаючись в точку *c*, зупиняється на відстані, дещо меншій частки періоду $3/4T$, внаслідок розсіяння енергії в реальних умовах протікання кавітаційного процесу. Даний факт призводить до того, що за

рахунок сил інерції мінімальний радіус бульбашки виявляється досить малим, щоб тиск газу всередині нього перевищив десятки атмосфер. Таким чином виникає початкова стадія кавітації.

3. Стадія розвиненої кавітації. Точка c являється тою границею, за якою починається найважливіший процес інтенсивного сплескування бульбашки. Так як на відстанях близько 5 мкм тиск ударної хвилі не перевищує $2 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^5$ Па, то така ударна хвиля на перебіг технологічних процесів ніякого впливу не робить, оскільки порівнянна із статичним тиском в рідині [77]. Швидкість руху бульбашки стає рівною нулю. Це і є миттєва рівновага, за якою здійснюється початок фази сплескування бульбашки. Зовнішні сили діють в одному напрямку і прагнуть стиснути бульбашку. Тобто сили, які прагнуть захопнути бульбашку, значно перевершують сили, що протидіють закриттю

$$(p_s + p_0 + \alpha p_{\Pi}) / p_{\Pi} \quad (5.124)$$

На ділянці дії зовнішніх сил від $3/4T$ до T фаза стискування зменшується, хоча знак і не змінюється. В роботі [77] зазначається, «що співвідношення $p_{\Pi} / (p_s + p_0 + \alpha p_A)$ на початку фази захопування в основному залежить від величини αp_A , тобто від того, в який момент часу по відношенню до періоду коливань починається фаза захопування». Подальше збільшення амплітуди звукового тиску призводить до значного збільшення амплітуди тиску при стисненні кавітаційної бульбашки. При сплескуванні усередині бульбашки створюються великі тиски до 10^9 Па. В бульбашці відбувається розігрів парогазової суміші до 8000...12000 К [77]. Утворені ударні хвилі при сплескуванні є основним рушійним фактором більшості технологічних процесів. Коливання бульбашки характеризуються високою радіальною швидкістю стінок, більшою за швидкість звуку (340 м/с) [77].

4. Стадія виродженої кавітації. При підвищенні амплітуди звукового тиску вище деякого критичного значення кавітаційні бульбашки досягають критичних розмірів, при яких відбувається їх виродження в довго живучі. Такі бульбашки протягом великого числа періодів здійснюють коливання біля

своїх максимальних розмірів (більш 100-1000 мкм). Довгоживучі бульбашки практично не захоплюються і, отже, не мають жодного інтенсифікуючого впливу на перебіг технологічних процесів в рідких середовищах. Так як розміри бульбашки змінюються незначно, то і витрати енергії на вчинення роботи зі зміни розмірів бульбашки виявляються так само невеликі. Однак через малий хвильовий опір області виродженої кавітації, такі бульбашки володіють великою екрануючою дією по відношенню до поширення УЗ коливань і перешкоджають подальшому поширенню УЗ енергії вглиб середовища. Можливе вторинне розширення і стиснення бульбашки, на що звертається увага в роботі [54], виходить за рамки задач дисертації і тому аналізу не підлягає.

Окрім тиску акустичного апарату, який спонукає до проявлення зародження бульбашок, виникають і інші характерні тиски (див. розд. 2) Тиск акустичного апарату в зоні контакту з середовищем і гідростатичний тиск представляють собою дію зовнішніх сил. Інші види тисків відносяться до внутрішніх реактивних дій і за своєю сутністю представляють ті відповідні напруження в середовищі та в бульбашках кавітаційній області, що виникають внаслідок зовнішніх дій. Для розриву ідеальної рідини (несучої фази) необхідно подолати сили міжмолекулярної взаємодії, що становлять $3 \cdot 10^9 \dots 3 \cdot 10^{10}$ Па [99]. При амплітуді звукового тиску до 10^5 Па для води або $3 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$ Па для масла [99] величина амплітуди коливань радіусу бульбашок зрівнюється з початковим радіусом і, тим самим, порушуються їх гармонійні коливання. Це локальне підвищення тиску супроводжується ударною хвилею з невеликою амплітудою тиску. На відстанях близько 5 мкм тиск ударної хвилі не перевищує $2 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^5$ Па.

Оцінити вплив зазначених вище різновидів тиску розглядом рівняння пульсацій кавітаційної бульбашки [84]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho_p} \left[p_0 - p_n - p \sin(\omega t) + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0. \quad (5.125)$$

Врахування в'язкості у рівнянні (5.125) дає можливість отримати повне рівняння пульсацій кавітаційної бульбашки:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[p_0 - p_n - p \sin(\omega t) + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\eta}{R} \frac{dR}{dt} - \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0 \quad (5.126)$$

Рішення даного диференціального рівняння, що представляє собою залежності відносного радіуса бульбашки R/R_0 від безрозмірного часу ωt [84] засвідчує розподіл амплітуд звукового тиску (рис. 5.11).

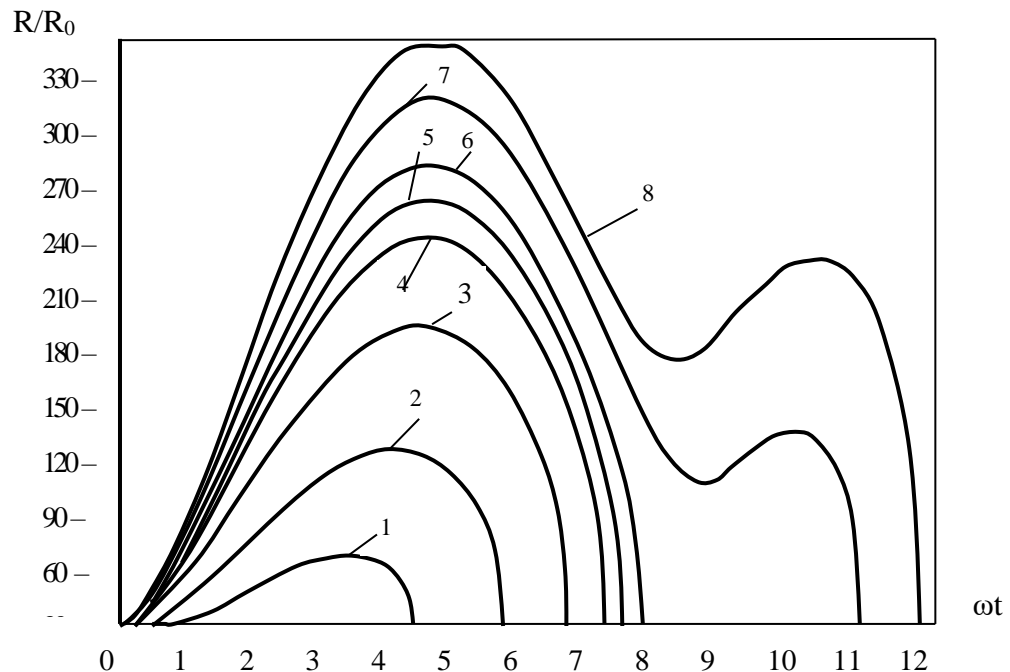


Рисунок 5.11 – Залежності відносного радіуса бульбашки R/R_0 від безрозмірного часу ωt для різних значень амплітуд звукового тиску

Криві отримані для бульбашок початкового рівноважного радіусу $R_0 = 10^{-6}$ м, пульсуючих адіабатично у воді при температурі 20°C при атмосферному тиску $p_0 = 10^5$ Па. Частота акустичних коливань 22 кГц. Як слідує із графіків, збільшення максимального радіуса кавітаційної бульбашки

прямо пропорційно амплітуді звукового тиску. Отже, значення максимального радіуса кавітаційної бульбашки є важливим параметром оцінки кавітаційної області.

5.5.2 Результати комп'ютерного дослідження параметрів кавітаційного процесу та їх аналіз

Методика та сутність дослідження. Методикою комп'ютерного дослідження параметрів кавітаційного процесу було визначено три етапи. На першому етапі важно було встановити достовірність прийнятих фізичних та математичних моделей шляхом розрахунку амплітуд коливань, визначення їх якісної картини та встановлення діапазону числових значень. Були вибрані типові технологічні середовища, характеристики яких визначалися, як за своїми результатами отриманих даних, так і за середніми значеннями, що були отримані різними дослідниками (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Вихідні дані реологічних та акустичних параметрів технологічних середовищ

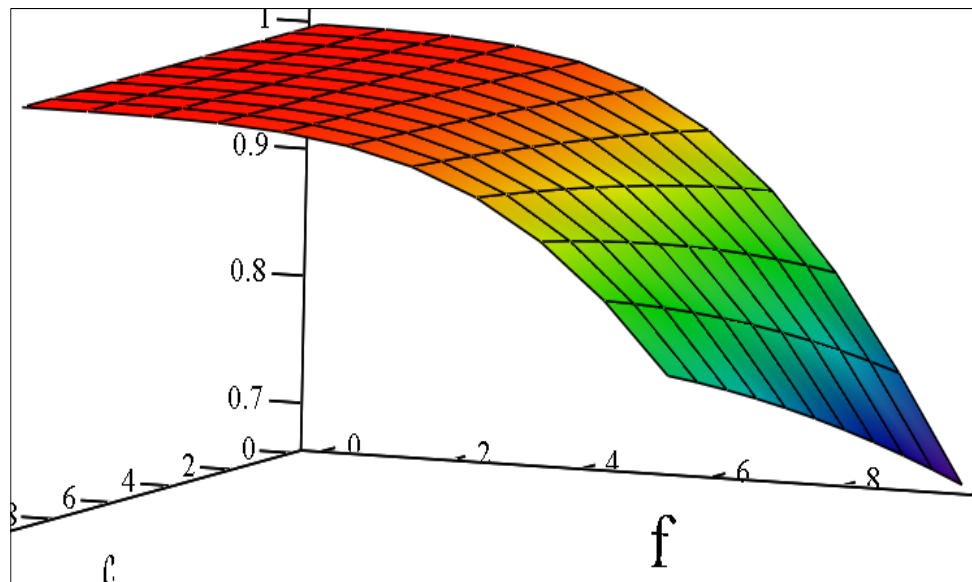
Рідина	Швидкість звуку, с м/с	Щільність ρ , кг/м ³	В'язкість η , 10 ⁻³ Па*с	Поверхневий натяг σ , 10 ⁻³ Н/м	Частота f , кГц	Довжина l , 10 ⁻³ м	Амплітуда A , мкм
Вода	1485	1000	0,82	73,0	22	0,5...100	4, 12, 20
Етиловий спирт (96%)	1165	798	1,2	22,8	22	0,5...100	4, 12, 20
Трансформаторне масло	1445	900	30	40	22	0,5...100	4, 12, 20
Оливкова олія	1381	950	85	32	22	0,5...100	4, 12, 20

При виборі числових значень було застосовано методику відбору за

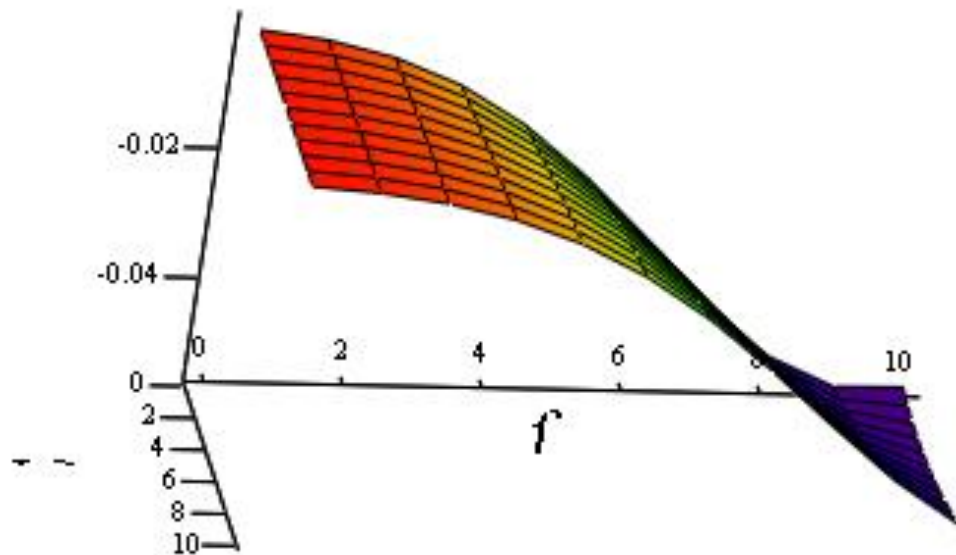
законом трьох сігма. Другий етап полягав у виконанні розрахунків на основі використання змінних у часі реологічних та акустичних параметрів, зміна яких є доказаним фактом досліджень. При цьому був визначений діапазон зміни параметрів із забезпеченням числових значень енергетичних характеристик, які обумовлюють виконання кавітаційного процесу. Третій етап досліджень передбачав аналіз результатів та кореляцію параметрів на виконання умов, зазначених критеріями (5.1). Сутність досліджень полягала у визначенні ступеня впливу реологічних властивостей (табл. 5.2) на зміну акустичних та динамічних параметрів середовища з метою підвищення ефективності якісного протікання робочого процесу акустичної кавітаційної обробки технологічних середовищ.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунків хвильових коефіцієнтів

Густина	кг/м^3	1000
Коефіцієнт в'язкості	Па/с	0,82000
Розмір камери у напрямку сили	м	0,001
Швидкість звуку	м/с	1300, 1320, 1340, 1360, 1400, 1420, 1440, 1460, 1480, 1500
Частота	кГц	10, 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5, 25, 27,5, 30, 32,5, 35



a



б

a - κ_1 ; *б* - κ_2

Рисунок 5.12 – Графіки зміни хвильових коефіцієнтів

На рис. 5.13 наведено алгоритм послідовності розрахунку хвильових коефіцієнтів та контактного тиску за аналітичними залежностями, які приведені в даному параграфі і частково отримані в роботі [23]

Середовище	Параметр	Числові дані
Вода	Вихідні дані	
	Швидкість звуку, м/с	$c = 1500,1499...30$
	Щільність, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho = 1000$
	В'язкість, Па	$\eta = 0,82 \cdot 10^{-3}$
	Поверхневий натяг, $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$
	Частота, Гц	$f = 22000$
	Довжина, м	$l = 0,0005$

Розрахунок параметрів

1. Кутова швидкість: $\omega = 2\pi \cdot f$ $\omega = 1,382 \cdot 10^5$

2. Період коливань: $T = \frac{2\pi}{\omega}$ $T = 1\text{А}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$

3. Коефіцієнти опору.

3.1. Коефіцієнт: $\gamma = 0,05$

3.2. Коефіцієнти: α і β : $\alpha(c) = \frac{\omega \cdot \gamma}{2 \cdot c}$ $\beta(c) = \frac{\omega}{c}$

4. Максимальна відстань розповсюдження хвилі: $l: l = 0,01$

5. Хвильові коефіцієнти та тиск.

5.1. Коефіцієнт κ_1 :
$$\kappa_1(c) = \frac{\alpha(c) \sin(2\beta(c) \cdot l) - \beta(c) \sinh(2\alpha(c) \cdot l)}{1 \cdot (\alpha(c)^2 + \beta(c)^2) \cdot (\cosh(2 \cdot \alpha(c) \cdot l) + \cos(2\beta(c) \cdot l))}$$

5.2 Коефіцієнт κ_2 :
$$\kappa_2(c) = \frac{\alpha(c) \sinh(2\alpha(c) \cdot l) + \beta(c) \sin(2\beta(c) \cdot l)}{1 \cdot (\alpha(c)^2 + \beta(c)^2) \cdot (\cosh(2 \cdot \alpha(c) \cdot l) + \cos(2\beta(c) \cdot l))}$$

5.3. Тиск:
$$p_{\text{хх1}}(c) = \sqrt{\kappa_1^2(c) + \kappa_2^2(c)}$$

Рисунок 5.13 – Алгоритм розрахунку хвильових коефіцієнтів та тиску

Приведені числові значення хвильових коефіцієнтів та графіки їх зміни (табл. 5.3, 5.4, рис. 5.14)

Таблиця 5.2 – Числові значення хвильового коефіцієнта κ_1

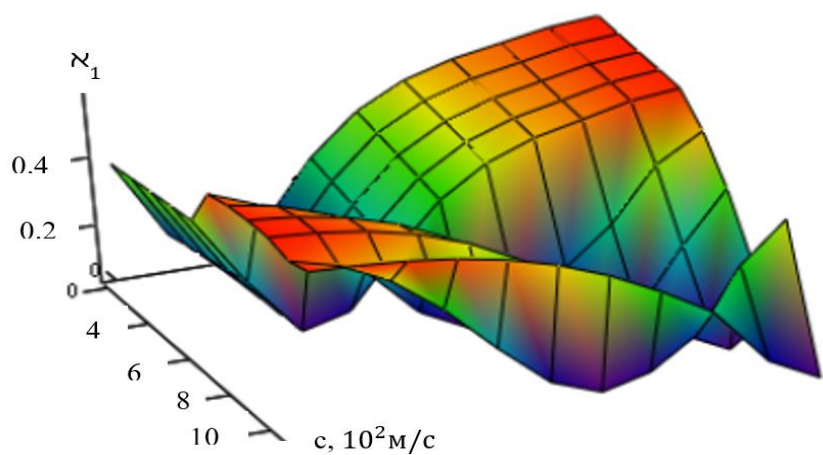
	0	1	2	3	4
0	55.977	145.779	582.262	$3.746 \cdot 10^3$	$3.601 \cdot 10^4$
1	53.297	133.866	502.895	$3.014 \cdot 10^3$	$2.682 \cdot 10^4$
2	50.852	123.532	437.963	$2.451 \cdot 10^3$	$2.026 \cdot 10^4$
3	48.613	114.512	384.399	$2.014 \cdot 10^3$	$1.551 \cdot 10^4$
4	46.554	106.591	339.867	$1.67 \cdot 10^3$	$1.203 \cdot 10^4$
5	19.177	31.494	51.643	90.939	184.876
6	13.23	20.9	31.494	47.415	74.375
7	9.747	15.197	22.198	31.494	44.655
8	8.509	13.23	19.177	26.797	37.011
9	15.762	25.254	39.267	62.678	108.478
10	6.286	9.747	13.998	19.177	...

Таблиця 5.3 – Числові значення хвильового коефіцієнта κ_2

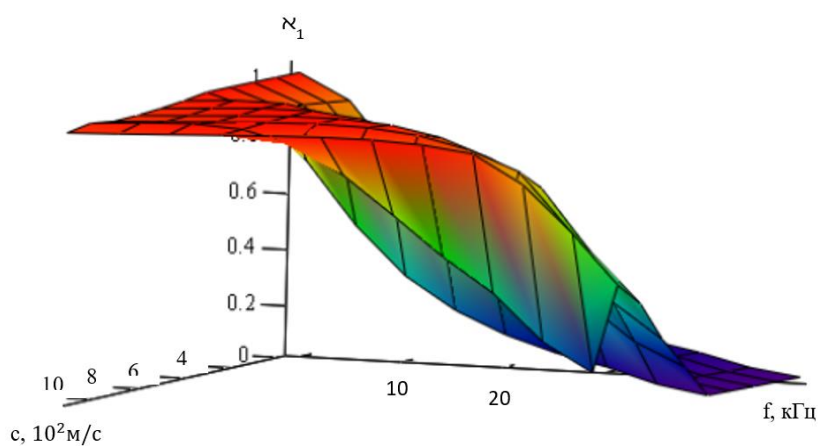
	0	1	2	3	4
0	-0.106	-0.22	-0.277	-0.223	-0.144
1	-0.1	-0.212	-0.277	-0.232	-0.152
2	-0.094	-0.204	-0.276	-0.24	-0.161
3	-0.089	-0.195	-0.274	-0.247	-0.17
4	-0.084	-0.187	-0.271	-0.254	-0.179
5	-0.018	-0.046	-0.096	-0.168	-0.241
6	$-8.625 \cdot 10^{-3}$	-0.022	-0.046	-0.086	-0.142
7	$-4.592 \cdot 10^{-3}$	-0.011	-0.024	-0.046	-0.079
8	$-3.467 \cdot 10^{-3}$	$-8.625 \cdot 10^{-3}$	-0.018	-0.035	-0.06
9	-0.012	-0.031	-0.065	-0.12	-0.189
10	$-1.854 \cdot 10^{-3}$	$-4.592 \cdot 10^{-3}$	$-9.682 \cdot 10^{-3}$	-0.018	...

Здійснені розрахунки та побудовані графіки засвідчують складну форму зміни хвильових коефіцієнтів. При цьому коефіцієнт κ_1 , що визначає вплив реактивного опору (пружно-інерційних властивостей), в певній області

прийнятих числових значень наближається до нуля, тобто за таких умов це біля резонансний режим. Коефіцієнт κ_2 , що визначає вплив активного опору (дисипативних властивостей), має значення в одній області, тобто впливає на зменшення як тиску, так і інтенсивності коливань.



a



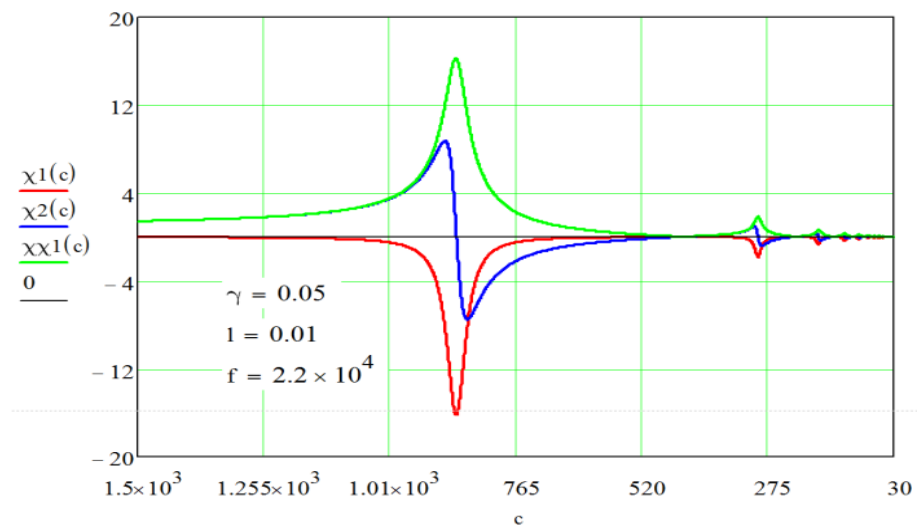
б

a - κ_1 ; *б* - κ_2

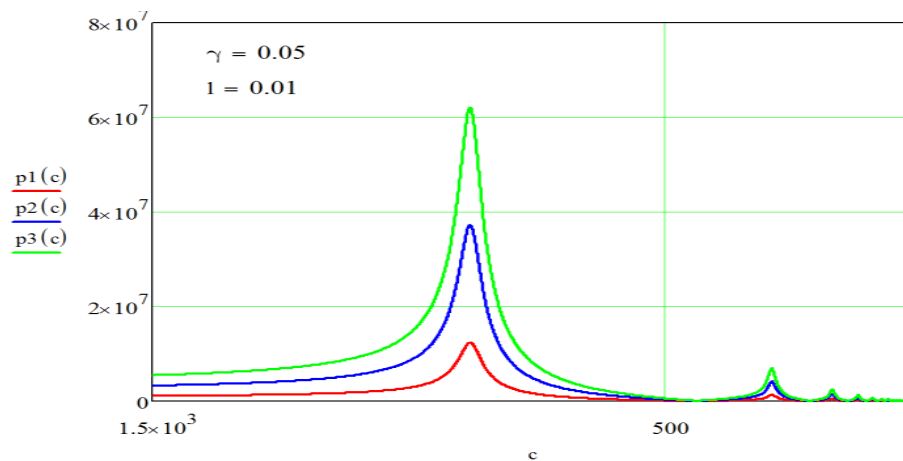
Рисунок 5.14 – Графіки зміни хвильових коефіцієнтів

На рис. 5.15 представлені графіки зміни хвильових коефіцієнтів та контактного тиску в залежності від зміни швидкості розповсюдження хвиль на етапах зародження бульбашок до кінцевої стадії сплескування, де швидкість зменшилася в 50 раз. Варто відмітити характер зміни хвильових коефіцієнтів за інших числових значень та зміни їх у часі. Так, один із коефіцієнтів $x^{1(c)}$ (червона крива) не змінює свій знак на протязі всіх стадій процесу, як це

зазначено і вище (див. рис. 5.14). Другий коефіцієнт $x^{2(c)}$ (синя крива) має ділянки як з позитивними, так і з від'ємними значеннями.



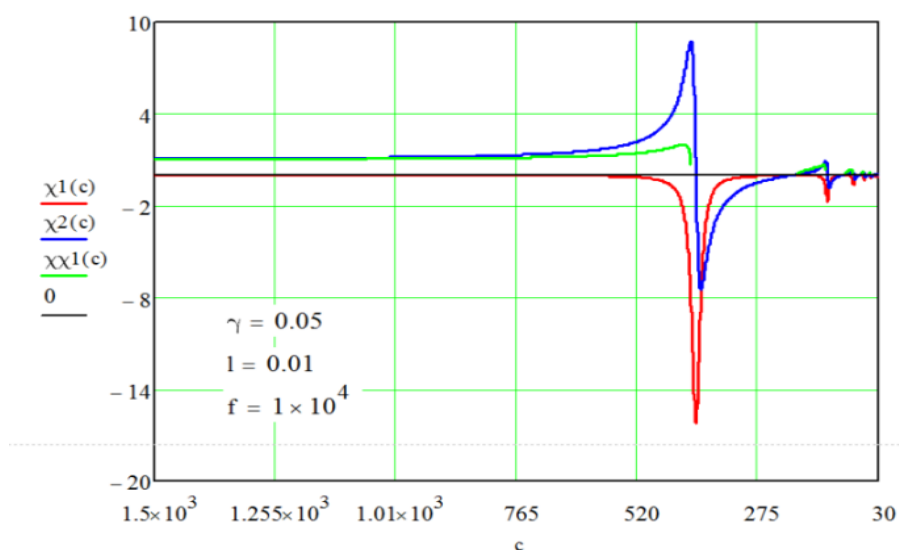
a



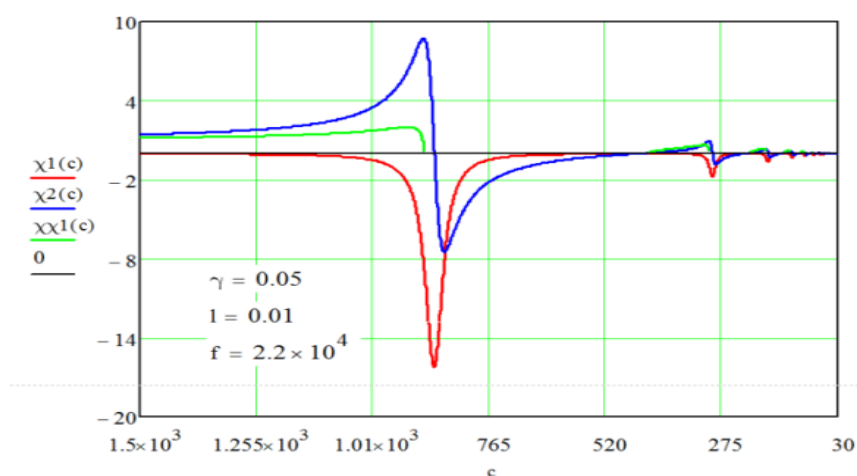
б

Рисунок 5.15 – Графіки зміни хвильових коефіцієнтів (а) та контактного тиску (б) в залежності від зміни швидкості розповсюдження хвиль в газорідному середовищі для трьох значень амплітуд коливань контактної зони: — $A = 4 \cdot 10^{-6}$ М; — $A = 12 \cdot 10^{-6}$ М; — $A = 20 \cdot 10^{-6}$ М

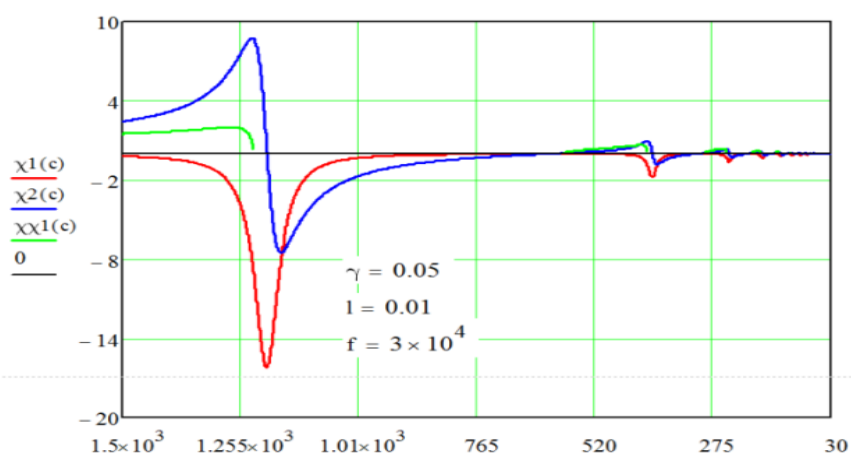
Такий характер зміни хвильових коефіцієнтів є важливим результатом впливу активних (червона крива) і реактивних (синя крива) складових тиску, що входять в загальну аналітичну залежність для визначення контактного тиску. Частота акустичної дії (рис. 5.16) та швидкість розповсюдження хвиль (рис. 5.17) суттєво впливають на характер зміни хвильових коефіцієнтів.



а

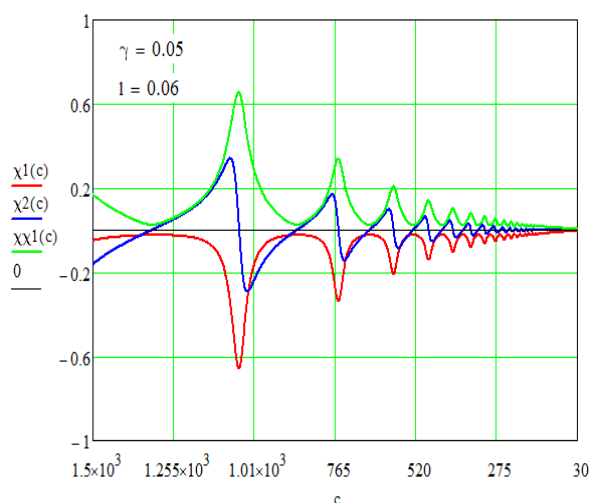


б

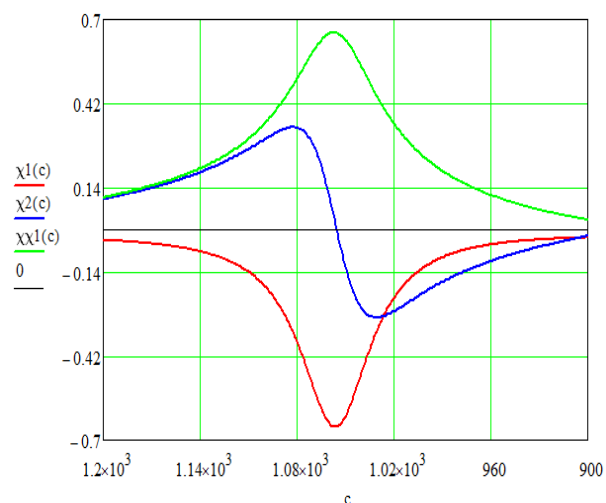


в

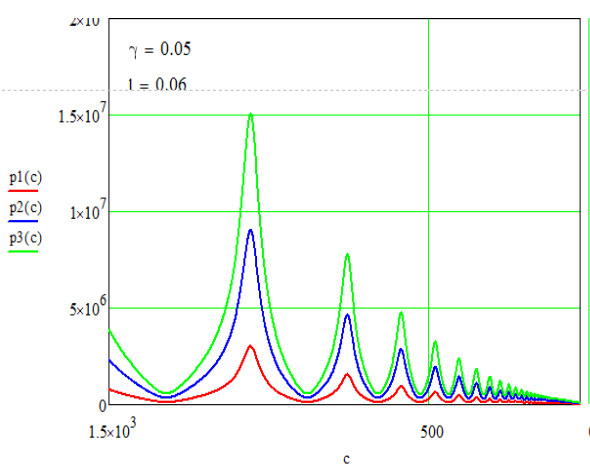
Рисунок 5.16 – Вплив частоти коливань на зміну хвильових коефіцієнтів: а – 10 кГц; б – 22 кГц; в – 30 кГц для трьох значень амплітуд коливань контактної зони: — $A = 4 \cdot 10^{-6}$ м; — $A = 12 \cdot 10^{-6}$ м; — $A = 20 \cdot 10^{-6}$ м



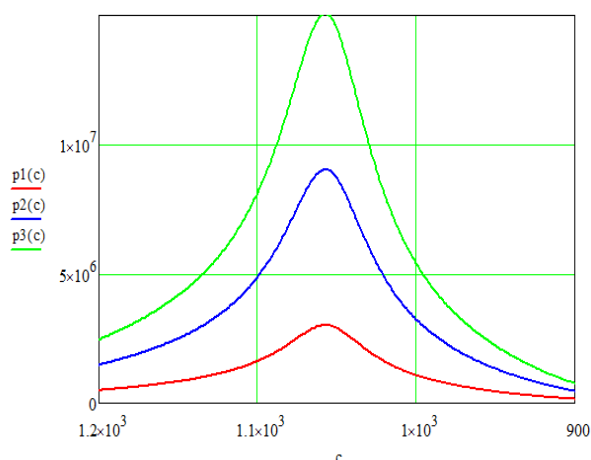
а



б



в



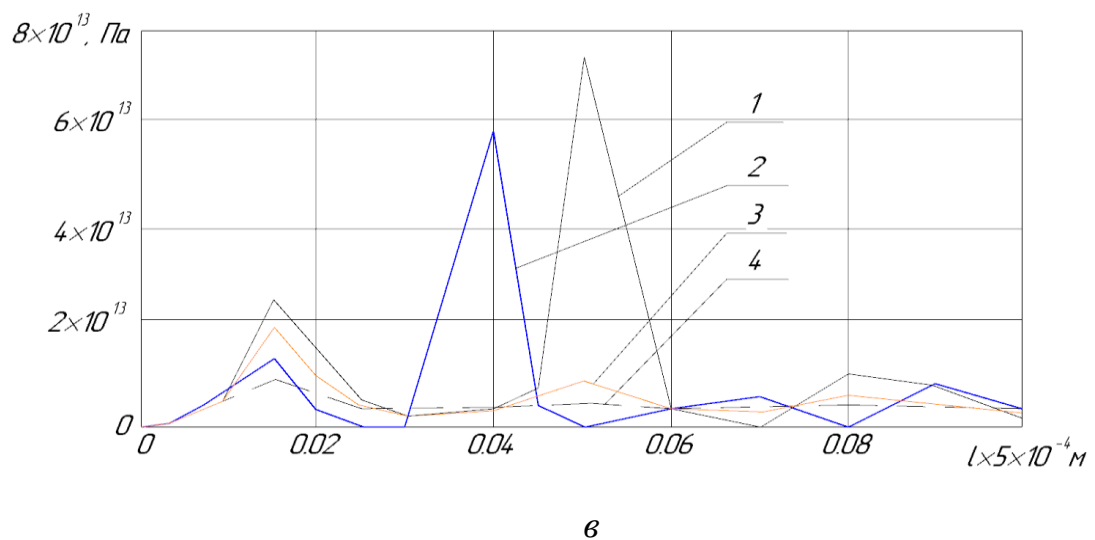
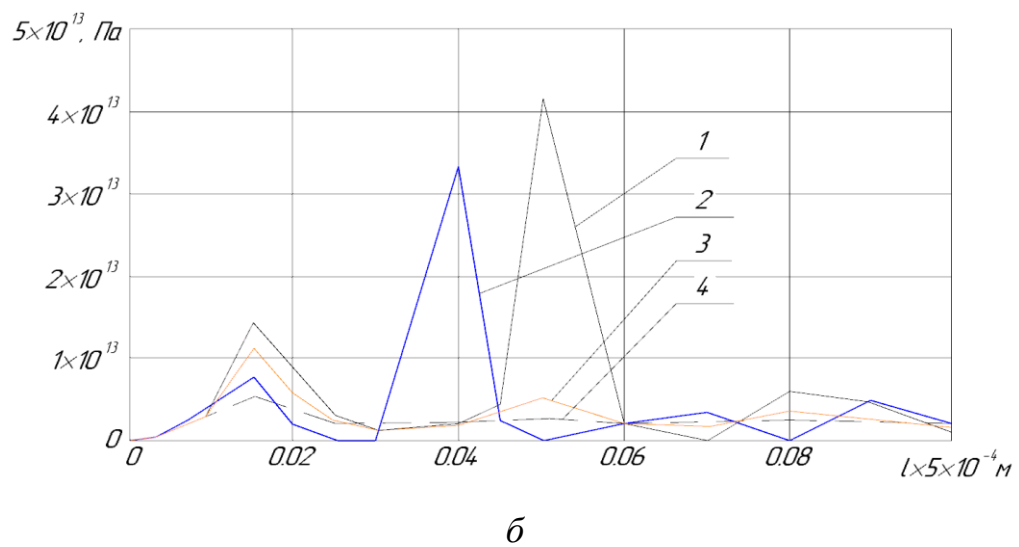
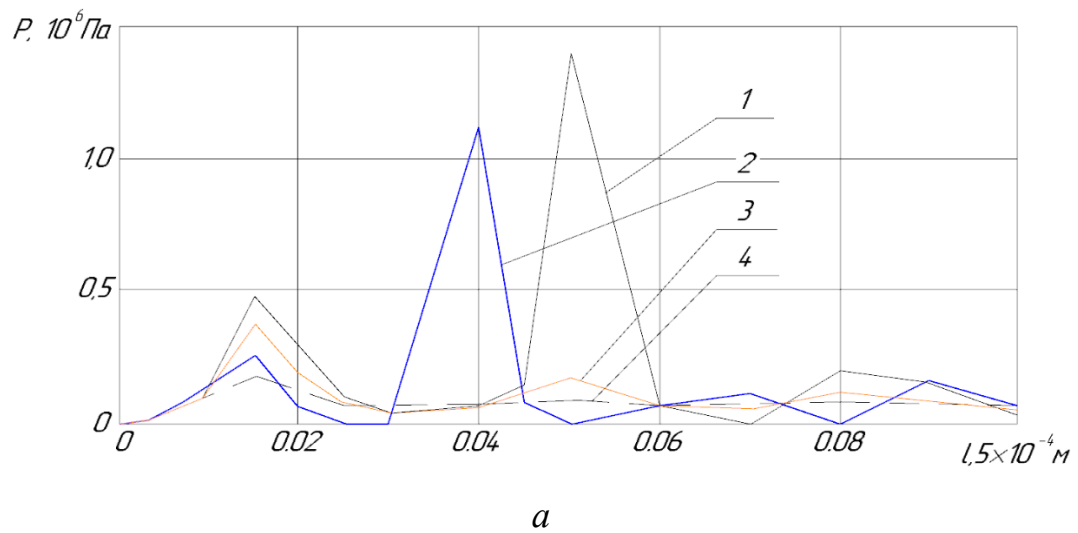
г

$$\begin{aligned} \text{Амплітуда, м} \quad A1 &:= 4 \cdot 10^{-6} & A2 &:= 12 \cdot 10^{-6} & A3 &:= 20 \cdot 10^{-6} \\ p1(c) &:= \rho \cdot l \cdot A1 \cdot \omega^2 \cdot \chi\chi1(c) & p2(c) &:= \rho \cdot l \cdot A2 \cdot \omega^2 \cdot \chi\chi1(c) & p3(c) &:= \rho \cdot l \cdot A3 \cdot \omega^2 \cdot \chi\chi1(c) \end{aligned}$$

а – (1500...30)м/с; б – (1200...900)м/с; в – (1500...0)м/с; г – (1200...900)м/с.

Рисунок 5.17 – Графіки зміни хвильових коефіцієнтів та контактного тиску в залежності від швидкості розповсюдження хвиль в середовищі

Наявність резонансних зон залежить від низки параметрів і, в тому числі, від характерного розміру кавітаційної камери у напрямку розповсюдження хвиль. Наведені вище рисунки, в тому числі і (рис. 5.17, 5.18) відкривають можливість реального їх використання при оптимізації режимів і параметрів кавітаційного апарату, що дозволить інтенсифікувати процес обробки різних середовищ.



Амплітуда коливань контактної зони *a* – $A=0,4\text{мкм}$; *б* – $A=0,12\text{мкм}$; $A=0,20\text{мкм}$; 1-вода; 2-етиловий спирт; 3 – трансформаторне масло; 4- оливкова олія

Рисунок 5.18 – Зміна тиску в напрямку розповсюдження хвильового процесу для різних середовищ

Виявлені резонансні зони та здійснена оцінка впливу ступені в'язкості на величину амплітуди коливань в досліджуваних середовищах.

Для з'ясування ступені впливу параметрів процесу на зміну коефіцієнтів α і β , були виконані відповідні дослідження.

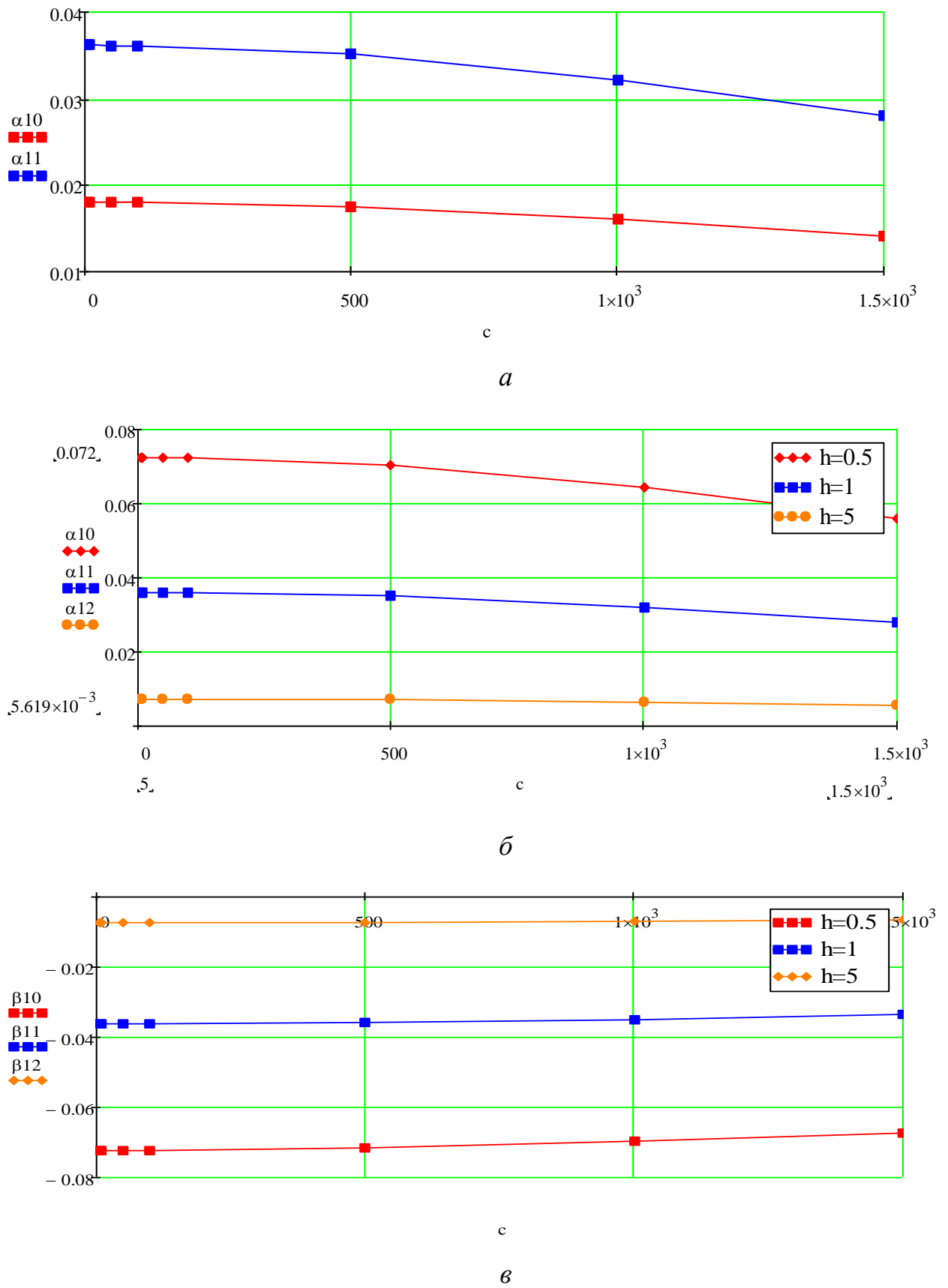
На рисунку 5.19 приведені графіки зміни коефіцієнтів α і β в залежності від швидкості розповсюдження хвиль для трьох характерних розмірів середовищ у напрямку дії силового навантаження.

Здійснений комп'ютерний експеримент, за наведеною вище, методикою дозволив вирішити задачу оцінити достовірність прийнятих фізичних і математичних моделей.

За виявленими реологічними властивостями середовищ були знайдені числові значення амплітуд коливань (пряма задача), а потім за знаними величинами акустичних характеристик і амплітуд коливань визначали пружні, інерційні та дисипативні характеристики (зворотня задача).

Надалі визначали найважливіший параметр – зовнішній тиск і по його значенням знаходили амплітуду коливань і порівнювали її значення із знайдених прямою задачею.

Проведені дослідження підтвердили достатню достовірність прийнятих фізичних і математичних моделей. Щодо розбіжностей між значеннями амплітуд коливань, отриманих різними методами, то ця розбіжність складає 12–15% . Менша розбіжність відноситься до середовищ з меншою в'язкістю, тому що параметри в резонансному режимі суттєво залежать від врахування дисипативних властивостей, які визначаються в'язкістю.



а, б – коефіцієнт α ; в – коефіцієнт β .

Рисунок 5.19 – Оцінка ступені впливу параметрів процесу на зміну коефіцієнтів α і β

5.6 Висновки по розділу

1. В основу виконання досліджень покладена гіпотеза, що визначення ефективних режимів і параметрів робочого процесу акустичної перехідної фізичної моделі від дискретного до континуального виду обробки технологічного середовища полягає у поетапному застосуванні. Виявлено, що за такої схеми математичні рівняння з достовірністю, достатньою для реальних умов, відображають протікання процесів зародження бульбашок, їх розвиток, утворення кавітаційної області бульбашок максимального об'єму та стадії їх сплескування.

2. Перехід від руху одинокої бульбашки (дискретна модель) до сплескування їх великої кількості (кавітаційна область, континуальна модель) в описі процесу обумовлено важливістю стадій розвитку та сплескування бульбашок. Запропоновано наглядний супровід поведінки бульбашок еволюцією рівнів складності формування кавітаційної області.

3. Отримані аналітичні залежності (5.6) – (5.19) вказують на необхідність враховувати в оцінці ефективності та швидкодії кавітації умови взаємодії між бульбашками та мати чітке уявлення про ступінь впливу на процес складових тиску, швидкості та співвідношення щільності середовища та бульбашки. Варто зазначити, що для визначення об'єму кавітаційного середовища необхідно враховувати і час дії.

4. Отриманий вираз (5.50) дає можливість визначити амплітуду ультразвукового тиску в залежності від в'язкості і товщини шару середовища для різних рідин. Важливим параметром, що входить в залежність (5.50) є коефіцієнт $K_{\text{хв}}$ (5.51), який враховує вплив хвильових процесів, що мають місце в середовищі при введенні ультразвукових коливань.

5. Складені рівняння та здійснено опис руху бульбашок при передачі енергії акустичним апаратом з нижньої та верхньої поверхонь оброблювального технологічного середовища із застосуванням континуальної моделі системи «кавітатор – середовище».

6. Отримано вираз (5.107), який дозволяє розрахувати амплітуду зсувів в будь-якому шарі кавітучого середовища. Це важливий результат. Формула показує, що амплітуда коливань не залишається постійною при зміні стадії кавітації. Вона залежить від висоти, на яку розповсюджується кавітація, та властивостей середовища, які враховуються коефіцієнтами a і b .

7. Отримані вирази (5.100 – 5.114) дозволяють розрахувати амплітуду коливань, як в середовищі, так і в контактній зоні, або по заданій амплітуді призначати необхідні параметри кавітаційного процесу. За допомогою вказаних формул представляється можливим визначити зони посилення або ослаблення амплітуди коливань для різних частот коливань, а також розрахувати напруження (5.116) в будь-якому шарі технологічного середовища.

8. Здійснений комп'ютерний експеримент дозволив вирішити задачу оцінки достовірності прийнятих фізичних і математичних моделей. За виявленими реологічними властивостями середовищ були знайдені числові значення амплітуд коливань (пряма задача), а потім за зраними величинами акустичних характеристик і амплітуд коливань визначали пружні, інерційні та дисипативні характеристики (зворотна задача).

9. Проведені дослідження підтвердили достатню достовірність прийнятих фізичних і математичних моделей. Щодо розбіжностей між значеннями амплітуд коливань отриманих різними методами, то ця розбіжність складає 12–15%. Менша розбіжність відноситься до середовищ з меншою в'язкістю, тому що параметри в резонансному режимі суттєво залежать від врахування дисипативних властивостей, які визначаються в'язкістю.

РОЗДІЛ 6

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

6.1 Вихідні положення створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище»

При створенні акустичної кавітаційної системи зазвичай задаються наступними величинами:

- робочою частотою коливань;
- коливальною потужністю апарату;
- необхідною інтенсивністю.

Забезпечення заданих значень цих величин вимагає цілої низки визначення та використання параметрів апарату та середовища. Раціональне випромінювання енергії в робоче середовище декларується [161] певними розмірами поверхні, що випромінює енергію, віддається належне випромінювачу. Приймається умова [161], що саме призначення випромінювача полягає в тому, щоб найбільш ефективно ввести енергію коливань в робоче середовище при заданих значеннях амплітуди коливального тиску або амплітуди коливальної швидкості і потужності. Необхідне узгодження з перетворювачем здійснюється деяким проміжним пристроєм, що входить в загальну хвильову систему, що має працювати в резонансному режимі, що також визначає, зокрема, її параметри. На цьому принципі визначаються необхідні конструктивні рішення, що пов'язані з особливостями побудови технологічних вузлів ультразвукової апаратури.

Разом з тим, проведеними дослідженнями [3, 4, 19, 25] визначено, що основним шляхом інтенсифікації методів акустичної обробки дисперсних середовищ є необхідність не окремо розглядати акустичну систему кавітатора, а і технологічне середовище, як важливу складову всієї системи незалежно від того чи впливає середовище, чи не впливає на рух кавітатора. Адже суть інтенсифікації полягає не в реалізації режиму на контакт з середовищем, а

безпосередньо в середовищі на стадії сплескування бульбашок. Конструктивні та технологічні параметри мають базуватися на ідеї, що вони створюються на реалізацію процесу збільшення ступеня концентрації енергії в газових бульбашках з максимальною їх кількістю сплескування в кавітуючому об'ємі технологічного середовища. Врахування множинного перетворення енергії ультразвукових коливань, як необхідність підвищення ефективності процесу, ґрунтувалося на поетапному визначенні якісної та кількісної картини утворення енергії в зоні контакту кавітаційного апарату і технологічного середовища та умов передачі енергії до технологічного середовища.

Визначення та послідовне вираховування етапів перетворення енергії для реалізації такої ідеї використані існуючі та розроблені нові критерії оцінки методів акустичної обробки технологічних середовищ: інтенсивність, співвідношення енергій, синергетичний коефіцієнт, коефіцієнт поглинання енергії, швидкості зміни тиску у часі; хвильового опору середовища в режимах кавітації до опору початкового стану середовища, швидкості акустичного апарату в контактній зоні до швидкості в середовищі від процесу зародження бульбашок кавітаційної області до процесу їхнього сплескування та інші. За таким підходом сформульовані синергетичні принципи вдосконалення режимів та параметрів систем «ультразвукова установка – технологічне середовище», що закладені в роботі на етапах формування мети, ідей, робочих гіпотез, задач та результатів їх вирішення.

Для формулювання основних положень створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище» синтезуємо основні результати, отримані в попередніх розділах дисертаційного дослідження. Так, важливим фактором підвищення ефективності акустичних апаратів є створення умов для їх можливої здатності ціле направлено спрямовувати енергію на протікання кавітаційного процесу обробки технологічного середовища. Головною проблемою, яку необхідно подолати при створенні умов реалізації максимального спрямовування потоків енергії,

є те, що акустичний апарат, як джерело енергії і технологічне середовище, як споживач енергії, володіють принципово різними властивостями та їх проявленням при взаємодії між собою. Адже за структурою ультразвукова технологічна система складається із наступних підсистем: електричний генератор; перетворювач електричних коливань в акустичні; випромінювач; пристрій, де знаходиться об'єкт обробки – технологічне середовище. При цьому важливим фактором є встановлене положення, що швидкість протікання кавітаційного процесу обробки технологічного середовища визначається не енергією первинної акустичної хвилі, а енергією, що спонукає сплескування кавітаційних бульбашок. Тому одним із перших вихідних умов створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище» є виконання співвідношення:

$$k_c = E_c/E_{n.x} \rightarrow \max, \quad (6.1)$$

де k_c – коефіцієнт синергії системи (коефіцієнт кавітаційного використання акустичної енергії); E_c – енергія на сплескування бульбашок (енергія, що витрачається на утворення кавітації в одиниці об'єму середовища); $E_{n.x}$ – щільність підведеної енергії первинної хвилі.

Очевидно, що не вся енергія $E_{n.x}$ витрачається на утворення кавітації, тобто $k_c < 1$. Умова (6.1) певним чином корелюється з виразами критеріїв (див. п. 6.1). Енергія, що виділяється при сплескуванні кавітаційних бульбашок, залежить не тільки від потужності акустичного випромінювання, а і від об'ємної щільності акустичної енергії. Окрім енергетичного показника враховується інформація про внутрішню структуру об'єму технологічного середовища: щільність, реологічні властивості, кількості кавітаційних бульбашок та усереднений розмір бульбашок, бажаний об'єм кавітуючих бульбашок, як складової продуктивності. Як це встановлено в розділах 3–5, зміна цих параметрів на всіх етапах протікання кавітаційного процесу є необхідною умовою визначення оптимальних режимів та параметрів.

Важливим аспектом є встановлення порогу кавітації, який і є порогом для процесів, які здійснюються внаслідок кавітаційних явищ в технологічних

середовищах. При інтенсивності первинної акустичної хвилі нижче порога кавітації процес або зовсім не здійснюється, або відбувається із низькою швидкістю. Поріг кавітації встановлено для технологічних середовищ з різними реологічними властивостями. Значення інтенсивності первинної акустичної хвилі, яка знаходиться в межах від порогу кавітації до режиму розвиненої кавітації, являється наступною умовою створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище». Обумовлено це тим, що при досягненні режиму розвиненої кавітації подальше збільшення інтенсивності первинної акустичної хвилі вже не є ефективним способом протікання процесу кавітації.

Шар середовища в контактній зоні, по відношенню до коливальної системи, можна розглядати як навантаження. Виходячи з цього припущення, будь-яке фізичне середовище (що є навантаженням на акустичну систему) може бути описане у вигляді системи, що складається з елементів маси, пружності і елементів тертя. Ці елементи системи можуть бути представлені активною і реактивною складовою (система з розподіленими параметрами) [26] або у вигляді пружно – інерційною і дисипативною (система із зосередженими параметрами) утворюють реакцію діючої на ці елементи зовнішньої сили кавітатора [30].

Отже, величина швидкості переміщення тієї або іншої точки технологічного середовища під впливом, прикладеної кавітатором, сили буде залежати не тільки від величини цієї сили, а й від величини зазначеної реакції. Цей важливий результат тепер є важливим не тільки з точки зору оцінки складових імпедансу середовища (реакцією), а і є важливою інформацією етапу створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище».

Наступним етапом створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище» являється розв'язання завдань системного аналізу щодо визначення моделі, найбільш наближеної до критеріїв, параметрів та інших характеристик, які відображають реальний

процес кавітації. Цілком очевидно, що найбільш наближеною є еталонна модель. Еталонна модель – це така модель, у якій немає цілого ряду частковостей, наявність яких є обов’язковою умовою у створенні будь-якої системи. Виходячи з поняття «еталонна модель», фізична та математична модель системи «ультразвукова установка – технологічне середовище» в роботі визначена на основі сформульованих гіпотез та умов їх реалізації та здійснених досліджень різних процесів кавітаційної обробки середовищ.

Такими гіпотезами та умовами є вирішені завдання:

- рух системи «ультразвукова установка – технологічне середовище» представляється в розрахунковій моделі, як єдиній моделі, застосування якої дає змогу за вказаних в постановці загального завдання умов, досягти екстремуму критеріїв оптимальності ;
- вибір структурних схем передач енергії від кавітатора до середовища, в яких реалізовані раціональні рішення (структурний синтез);
- визначення оптимальних динамічних параметрів кавітаційного процесу (динамічний синтез).

Початковим етапом вирішення цих завдань було отримання математичної моделі, вибір формалізованого критерію й обґрунтування обмежень – все це і є математичним формулюванням вирішених в роботі завдань (розділи 2 – 5). Робочий процес описаний найбільш наближеними до реальних умов дискретно-континуальними рівняннями. Отримані рішення у вигляді аналітичних залежностей розкрили закономірність протікання процесу (якісна картина процесу) та дали можливість визначити кількісні значення раціональних параметрів ефективного протікання кавітаційного процесу обробки технологічного середовища.

У виконаних дослідженнях була прийнята умова, за якої плоска акустична хвиля по осі X від апарату до границі з середовищем розповсюджується з акустичним опором Z_a , а в середовищі на границі з апаратом по цій же осі X , внаслідок дії цього опору, виникає хвильовий опір

середовища Z_c . Власне, використовувався імпедансний метод визначення взаємодії та трансформації енергій в середовище.

Математичні співвідношення визначали оптимальність системи, в рамках прийнятих допущень, відкрили можливість запропонувати конструктивні та технологічні напрямки створення потрібної конструктивної схеми ультразвукової установки. Саме ці результати досліджень стали остаточним етапом створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище», які полягали у необхідності створення системи контролю та можливого керування процесом акустичної обробки технологічного середовища. Ідеальні системи керування слугують передумовою пошуку реальних конструктивних схем технічних об'єктів із параметрами, близькими до оптимальних.

Отже, визначена модель, це математична модель, в якій керування є оптимальним в сенсі визначеного критерію (6.1) за встановлених обмежень.

Реалізація схеми керування параметрами та характеристиками включає цілеспрямований пошук, в якому відкривається широкий простір для винахідництва, створення такої реальної системи, в якій можна досягти максимального ефекту. Така модель, яка сформована в роботі на основі врахування домінуючих властивостей акустичної системи та середовища, встановлення закономірностей їх спільної взаємодії є вихідною і єдиною для створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище».

Порівняння показників наявних і синтезованих в подальшому із встановленими дає змогу сформулювати висновок щодо того, чи варто вести далі пошук нових структур, чи обмежитися наявними. Отже, у вирішенні завдань структурного синтезу отримані закономірності є орієнтиром для структури створюваної оптимальної системи. Абстрагуючись від конкретних конструктивних рішень акустичного апарату (вибір схеми апарата залежить від заданого режиму, граничних умов взаємодії), прийнята в роботі модель системи «ультразвукова установка – технологічне середовище» описується

найбільш наближеними до реальних умов протікання процесу дискретно-континуальними рівняннями із врахуванням різних за фізичною природою та законами зміни у часі їхніх параметрів.

Розглянемо вплив параметрів кавітаційного процесу на утворення об'єму кавітуючого технологічного середовища. По аналогії з загальним функціоналом (2.1) швидкість зміни об'єму бульбашок V можна представити наступною функціональною залежністю:

$$V(t) = f(t, R_0, l, n, \rho_l, \mu_l, \sigma, \rho_g, \mu_g, p_3, p_6). \quad (6.2)$$

Приймаючи час t , радіус бульбашки R_0 , щільність ρ_l , як основні незалежні параметри за розмірністю та використовуючи основні положення теорії розмірностей, приведемо всі параметри (6.2) до безрозмірного виду відносно утвореного об'єму бульбашок: t - час, $[T]$; l - характерна довжина у напрямку хвильового руху бульбашок, $[L]$; R_0 - початковий радіус бульбашки, $[L]$; n - кількість бульбашок на одиницю об'єму, $\left[\frac{1}{L^3}\right]$; ρ_L - щільність середовища, $\left[\frac{M}{L^3}\right]$; μ_L - в'язкість, $\left[\frac{M}{LT}\right]$; σ - поверхневий натяг, $\left[\frac{M}{T^2}\right]$; ρ_g - щільність газу, $\left[\frac{M}{L^3}\right]$; μ_g - в'язкість газу, $\left[\frac{M}{LT}\right]$; p_3 - зовнішній тиск $\left[\frac{M}{LT^2}\right]$; p_6 - тиск всередині бульбашок, $\left[\frac{M}{LT^2}\right]$.

Тоді функціональну залежність (6.2) можна представити в безрозмірному виді:

$$\frac{V}{\frac{4}{3}\pi R_0^3/t} = f\left(\frac{l}{R_0}; nR_0^3; \frac{\mu_l}{\rho_l R_0^2/t}, \frac{\sigma}{\rho_l R_0^3/t^2}, \frac{\rho_g}{\rho_l}, \frac{\mu_g}{\rho_l R_0^2/t}, \frac{p_3}{\rho_l R_0^2/t^2}, \frac{p_3 - p_6}{\rho_l R_0^2/t^2}\right). \quad (6.3)$$

Наступною процедурою аналізу (6.3) є оцінка важливості врахування складових цієї залежності на швидкість утворення об'єму кавітуючого технологічного середовища. Якщо прийняти умову часу сплескування τ_c бульбашки у вигляді [84]:

$$\tau_c = 0.915 R_0 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_3 - \rho_6}}, \quad (6.4)$$

то залежність (6.3) можна переформувати до виду:

$$\frac{V}{\frac{4}{3} \pi R_0^3 / \tau_c} = f(l; N; \frac{\mu_l}{\rho_L R_0^2 / \tau_c}, \frac{\sigma}{\rho_l R_0^3 / \tau_c^2}, \frac{\rho_2}{\rho_l}, \frac{\mu_2}{\rho_l R_0^2 / \tau_c}, \frac{p_3}{p_3 - p_6}, \frac{t^2}{\tau_c^2}). \quad (6.5)$$

Для середовищ з малою в'язкістю на стадії сплескування бульбашок за даними роботи [84] можна знехтувати в'язкістю та поверхневим натягом.

Тоді залежність (6.5) для таких умов можна спрости до виду:

$$\frac{V}{\frac{4}{3} \pi R_0^3 / \tau_c} = f(l; N; \frac{p_3}{p_3 - p_6}, \frac{t^2}{\tau_c^2}). \quad (6.6)$$

Отримана залежність засвідчує важливість впливу тиску, діаметру бульбашки та часу сплескування на швидкість утворення об'єму кавітаючого середовища з малою в'язкістю. Для інших технологічних середовищ використовується залежність (6.3). В таблиці 6.1. приведені розрахунки числових значень об'єму кавітаційної зони в залежності від інтенсивності.

Таблиця 6.1 – Числові значення утворення об'єму кавітаційної зони в залежності від інтенсивності

Показник	Значення					
Інтенсивність, Вт/см ²	5,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0
Об'єм кавітаційної зони, м ³ *10 ⁻⁴	0,10	0,30	0,40	0,42	0,44	0,46

Важливість даних цієї таблиці полягає в тому, що відношення об'єму бульбашок, що не сплескувалися ΔV_d (довгоживучі бульбашки) до об'єму бульбашок, які сплескуються ΔV_k , являється оцінкою ефективності процесу кавітації:

$$K_{об} = \Delta V_d / \Delta V_k. \quad (6.7)$$

В цілому визначена низка критеріїв та ключових параметрів, використання яких пропонується у якості оцінки в алгоритмах розрахунку в

залежності від тих чи інших відомих вихідних даних кавітатора та середовища (табл. 6.2)

Таблиця 6.2 – Критерії та ключові параметри оцінки ефективності кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ

№	Критерій, параметр	Аналітична залежність
1	2	3
1	Інтенсивність кавітаційного процесу за видом коливань.	
1.1	Синусоїдальні коливання, $I, \text{Вт/см}^2$	$I = \frac{p^2}{2\rho c}; \quad I = A^2 \times f^3.$
1.2	Двочастотні коливання, $I, \text{Вт/см}^2$	$I = \frac{\alpha \times A}{4\pi^2 T} \times \frac{(1+kn)^2}{2}.$
1.3	Багаточастотні коливання, $I, \text{Вт/см}^2$	$I = \frac{\alpha \times A}{4\pi^2 T} \times \frac{(1 + \sum k_i n_i)^2}{2}.$
1.4	Нелінійні (не синусоїдальні) коливання, $I, \text{Вт/см}^2$	$I = \frac{\alpha \times A}{4\pi^2 T}.$
2	Коефіцієнт синергії системи (ККД), κ_c	$\kappa_c = E_o/E_{n.x}.$
3	Швидкість зміни напруженого стану середовища у часі, $v_{н.с}, \text{Н/м}^2\text{с}$	$v_{н.с} = \frac{d\sigma}{dt}.$
4	Коефіцієнт співвідношення об'ємів бульбашок довго живучих і кавітуючих, $K_{об}$	$K_{об} = \Delta V_o / \Delta V_k.$
5	Коефіцієнт зміни енергії у часі за весь період обробки бульбашок, $\mu, \text{Дж/с}$	$\mu = 1/T(\ln E_o / E_k).$
6	Коефіцієнт поглинання енергії, $a_n, \text{м}^{-1}$	$a_n = P_{num}/I.$
7	Коефіцієнт співвідношення хвильових опорів кавітаційного середовища, $\kappa_{он}$	$\kappa_{он} = \frac{\rho_k c_k}{\rho_c c_c} = \left[\frac{1}{1 + \frac{K\beta_n}{\beta_0}} \right]^{1/2}.$
8	Коефіцієнт співвідношення швидкостей, κ_v	$\kappa_v = v_o/c_k.$

1	2	3
9	Коефіцієнт співвідношення часу сплескування до часу періоду коливань, κ_t	$\kappa_t = \tau/T.$
10	Робота контактної зони, $A_{kз}$, Дж	$A_{kз} = \pi m_c x_0^2 \omega^2 \mu.$
11	Робота на утворення кавітаційних бульбашок, $A_{кб}$, Дж	$A_{кб} = \frac{4}{3} \pi R_m^3 P_0 N.$
12	Питома робота кавітатора, \bar{A} , Дж	$\bar{A} = \bar{P} \cdot t.$
13	Питома робота об'єму кавітуючого середовища, A_c , Дж	$A_c = E_c \Delta V.$
14	Коефіцієнт переходу акустичної енергії в енергію ударних хвиль, η_y	$\eta_y = \eta \frac{E_y T}{E_k \tau}.$
15	Продуктивність кавітаційного процесу, $\Delta\Pi$, м ³ /с	$\Delta\Pi = kP/E_c.$
16	Амплітуда переміщення бульбашки, A_{δ} , мкм	$A_{\delta} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}.$
17	Амплітуда швидкості бульбашки, v_{δ} , мкм/с	$v_{\delta} = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}.$
18	Амплітуда прискорення бульбашки, a_{δ} , мкм/с ²	$a_{\delta} = \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}.$
19	Власна частота коливань бульбашки (дискретна модель), $\omega_{вл}$, рад/с	$\omega_{вл} = \sqrt{\left[\frac{3\gamma}{\rho R_0^2} (P_0 + \frac{2\sigma}{R_0}) - \frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + \frac{2c_{np}}{\rho R_0^3} \right] - \left(\frac{2\pi\delta_{np}}{\omega} \right)^2}.$
20	Власна частота коливань бульбашки (континуальна модель), $\omega_{вл}$, рад/с	$\omega_{вл} = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{(E' + iE'')(t_c)}{\rho(t_c)}}.$
21	Відносний розмір бульбашок, κ_{δ}	$\kappa_{\delta} = R_m/R_0.$

В наведеній таблиці критерії та ключові параметри приведені в послідовності реалізації оцінки можливих режимів та ефективності кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ. Основна низка

критеріїв передбачає оцінку енергетики процесу, як ключової характеристики, так і врахування можливих змін ключових параметрів від стадії зародження бульбашок до кінцевої стадії – сплескування бульбашок. Вкрай важливими є критерії, які прямо визначають достовірність вибору режиму (гармонійний чи імпульсний режим). До них відносяться критерії 8, 9 та 12. Важливість критерію 8 полягає у достовірності вибраної швидкості кавітаційного апарату, а критерій 9 є прямим показником співвідношення часу сплескування та періоду технологічного процесу. Саме числове значення цього критерію визначає забезпечення мінімального значення співвідношення (6.7) та можливу доцільність використання імпульсного режиму навантаження на технологічне середовище.

Застосування того чи іншого критерію обумовлено тою вихідною інформацією та поставленою метою, що формулюється перед дослідником для вибору моделі та параметрів, чи інженером по створенню необхідної акустичної хвильової системи конкретного технологічного процесу обробки або створення нового технологічного середовища (наприклад, вибір моделі (див. табл. 1.3, рис. 1.8) за схемою досліджень (див. рис. 5.1).

Подібний приклад можна навести і для створення необхідної акустичної хвильової системи (див. рис. 1.17 та табл. 1.4). Для реалізації критеріальної оцінки обґрунтування раціонального вибору структурно-параметричної системи «акустичний апарат – технологічне середовище» запропоновано алгоритм (рис. 6.1).

Сутність алгоритму полягає у можливості варіювати не тільки вихідними параметрами та схемою розташування кавітатора відносно оброблювального середовища, а і визначити вплив змінних параметрів на максимальне значення того чи іншого критерія (табл. 6.2). В залежності від постановки задачі, вибирається критерій, який фіксується в блоці 8. Надалі в блоці 2 «Формування технологічної схеми» здійснюються попередні розрахунки щодо режиму передачі енергії до середовища у відповідності до вибраного критерію.

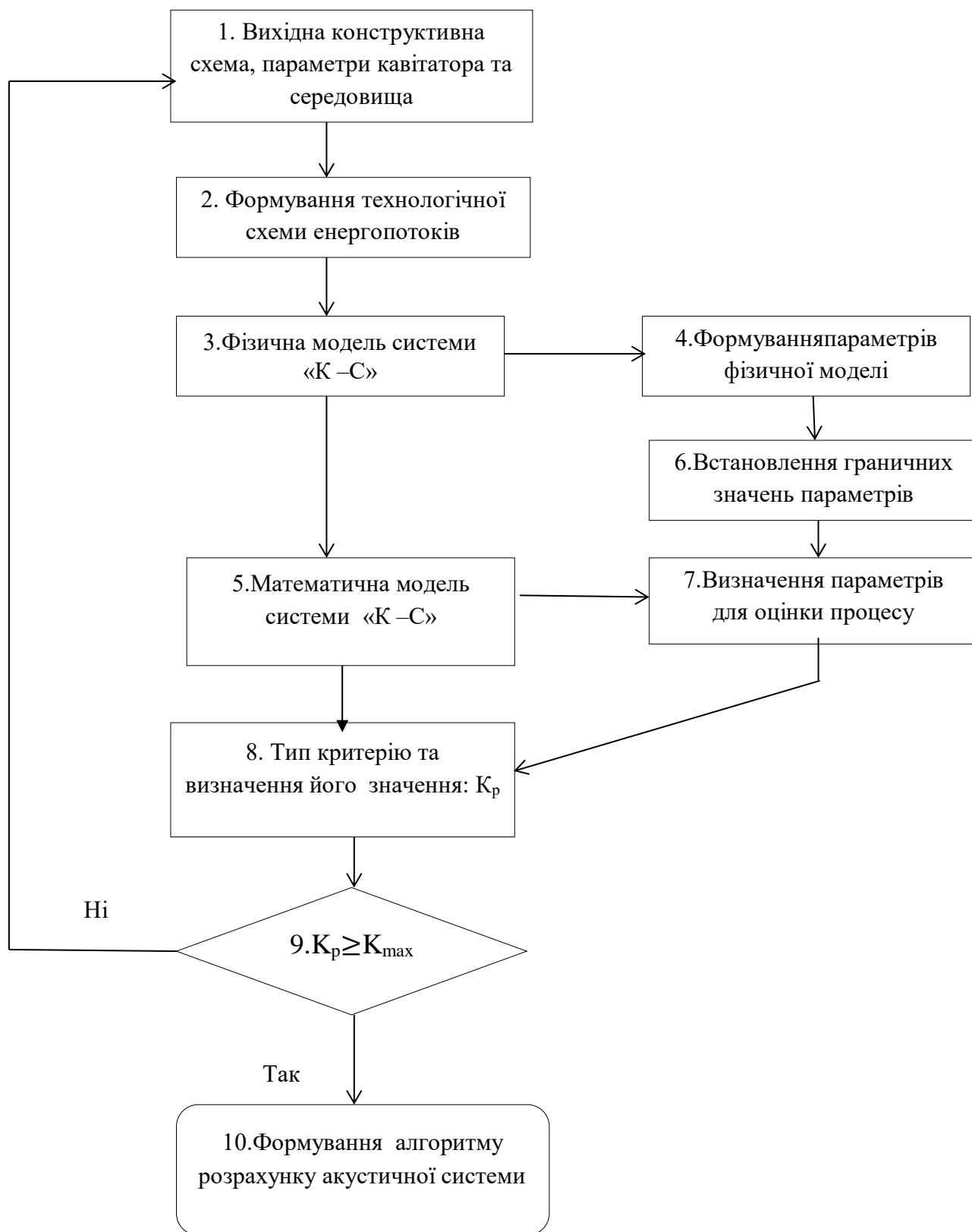


Рисунок 6.1 – Схема критеріальної оцінки обґрунтування
раціонального вибору структурно – параметричної системи «акустичний
апарат – технологічне середовище»

Важливим етапом алгоритму є блоки 3 і 5, які визначають фізичну та математичну моделі на основі, виконаних і приведених вище (розділи 3 – 5), результатів дослідження. Саме в блоках 4,6,7 формуються вихідні дані для визначення числових значень параметрів впливу та границі раціонального їх використання. Завершенням розрахунку є параметри, що слугують вихідною інформацією для остаточного прийняття рішень вдосконалення раціональних конструктивних та технологічних параметрів акустичного кавітатора.

Така технологія запропонованого алгоритму є принципово новою системою автоматичного перебору параметрів до виконання умови забезпечення критерія блоку 9. Другим важливим аспектом цього алгоритму є створення системи управління процесом обробки об'єктів ультразвуковою кавітаційною установкою в оптимальному режимі її роботи. Коефіцієнт поглинання енергії (критерій 6), як це визначено в розділі 3 (формула 3.22), характеризує зміну питомої енергії P_{num} та інтенсивності ультразвуку I в опромінюваному середовищі і слугує критерієм оцінки ефективності протікання процесу акустичної обробки цього середовища.

6.2 Граничні значення акустичних параметрів

Синтезуючи виконані дослідження [1–58], можна записати наступні функціональні залежності для розрахунку синергетичних режимів та параметрів акустичної системи технологічного обладнання.

Загальний функціонал (залежність 2.1):

$$F = f\{A, A_i, f, v, W, P, L, t, l, p, \sigma, c, E, p, \mu\}.$$

Енергетичний баланс акустичної системи (залежність 4.12):

$$A_z = A_{\kappa} + A_{y.b} + A_{y.xs} + A_m + A.$$

Швидкість зміни об'єму бульбашок (залежність 6.2):

$$V(t) = f(t, R_0, a, n, \rho_L, \mu_L, \sigma, \rho_{A0}, \mu_A, p_{\infty}, p_B).$$

У роботі виконано аналіз (розд. 2.1 та 4.12) з метою визнання не лише складності досліджуваного процесу, а оцінки його із визначенням силових та енергетичних характеристик і параметрів, як мети для встановлення фізичної та математичної моделі.

Перехід до безрозмірної форми представлення параметрів у формі (6.3), враховуючи вище здійснені дослідження, дає можливість наблизити наше уявлення та визначення найбільш адекватної моделі реальному процесу взаємодії підсистем. Вихідна, перша підсистема, це створення та передача енергії акустичного апарату та друга, це технологічне середовище, як підсистема максимального ефективного використання підведеної енергії (критерії 6.1, 6.7).

Тепер визначимо необхідний ступінь впливу і врахування стадій, раціональних режимів та параметрів для розробки методик, що реалізують підвищення ефективності протікання кавітаційного процесу за умов мінімізації енергетичних витрат.

Поріг кавітації. Поріг кавітації відображає собою якісну картину процесу кавітації, пов'язану зі стадією виникнення кавітаційних бульбашок, що є важливим аспектом подальшого розвитку стадій розширення області кавітуючих бульбашок та їх сплескування. Цілком очевидно, що всі параметри функціонала (2.1) впливають на встановлення порогу кавітації, як стартової стадії протікання технологічного процесу. І в цьому зв'язку, саме найважливішим для інтенсифікації режимів і параметрів є точне визначення зародження двофазної системи «вихідне середовище – повітря», як гарантованої передумови виникнення кавітації.

Разом з тим, при всьому очевидному понятійному визначенні акустичного методу технологічного процесу кавітації [4], точне встановлення порогу кавітації певною мірою представляє собою вкрай складну задачу. Обумовлено це тим, що при певному співвідношенні параметрів можуть виникати коливання технологічного двофазного середовища не тільки на основній гармоніці, а і на відмінній від основної частоті коливань [24]. В

такому режимі може виникнути не перший, а другий поріг кавітації. Тоді поняття лінійна швидкість, як фактор корекції порогу, прискорення, інтенсивність втрачають просте лінійне визначення. Система «вихідне середовище – повітря», стає суттєво нелінійною. Тому, точне визначення порогу виникнення кавітації є прийняття таких передумов і допущень, які однозначно дають можливість засвідчити, що існує та чи інша форма коливань. Адже тільки в такому випадку можна передбачити закономірність протікання відповідних стадій процесу кавітаційної обробки того чи іншого технологічного середовища.

Виходячи з вищезначеного, в теоретичній частині досліджень при обґрунтуванні методів (розд. 2), визначенні законів зміни параметрів (розд. 3 та 4), оцінці енергетики процесу кавітації (розд. 5) значна увага приділялась прийнятим передумовам і допущенням. Так, враховувано реологічні властивості технологічних середовищ, враховано ступінь впливу не тільки пружних та інерційних властивостей, а і дисипативних, які в системах, що реалізують резонансні режими, є домінуючими.

До уваги приймалася класична теорія акустики [116, 207, 268], обґрунтування здійснювалося на основі застосування дискретних та континуальних моделей [17, 18, 24-27]. Досліджено основні умови виникнення першого та другого порогу кавітації, що враховуються при формуванні алгоритмів і методів вдосконалення режимів і параметрів акустичної дії на технологічні середовища (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Основні умови виникнення порогу кавітації

Параметри	Перший поріг	Стадії кавітації	Другий поріг
Швидкість коливань, v , м/с	$v=0,1$	$1 < v < 5,0$	$v > 5,0$
Інтенсивність I , Вт/см ²	$0,1 < I < 10$	$1 < I < 10$	$I > 10$

Приведені числові значення відповідають дії акустичної кавітації на воду. При цьому варто зазначити, що виникнення субгармонійних складових залежить не тільки від швидкості коливань, а і від частоти та співвідношення складових тисків.

Властивості технологічного середовища. Внаслідок силової дії акустичного апарату на рідинне, чи інше технологічне середовище, виникнення бульбашок та їхній розвиток обумовлений наявністю та відповідним впливом наступних характерних тисків: $p_{ак}$ – тиск акустичного апарату в зоні контакту з середовищем (звуковий тиск); $p_{гс}$ – гідростатичний тиск; p_p – тиск в рідині; p_n – сил поверхневого натягу; $p_{вт}$ – сили в'язкого тертя; p_b – внутрішній тиск в кавітаційній бульбашці; p_g – тиск газів; $p_{нп}$ – тиск насиченого пару в рідині.

Ключовим параметром еволюції газових і повітряних бульбашок в акустичному полі є звуковий тиск, який формується в контактній зоні системи «акустичний апарат – середовище». Тиск акустичного апарату в зоні контакту з середовищем (звуковий тиск) і гідростатичний тиск представляють собою дію зовнішніх сил. Інші види тисків відносяться до внутрішніх реактивних дій і за своєю сутністю представляють ті відповідні напруження в рідинному середовищі та в бульбашках кавітаційній області, що виникають внаслідок зовнішніх дій. Використані реологічні моделі враховують такі основні властивості: пружність, в'язкість, пластичність. Доцільність їхнього врахування залежить від ступеня впливу на параметри акустичного апарату, що зумовлено конкретною технологічною операцією робочого процесу обробки.

Для розриву ідеальної рідини (несучої фази) необхідно подолати сили міжмолекулярної взаємодії, що становлять $3 \cdot 10^9 \dots 3 \cdot 10^{10}$ Па. За амплітуди звукового тиску (до 10^5 Па для води або $3 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$ Па для масла) величина амплітуди коливань радіусу бульбашок зрівнюється з початковим радіусом, і тим самим, порушується їх гармонійні коливання. Це локальне підвищення тиску супроводжується ударною хвилею з невеликою амплітудою тиску. На

відстанях близько 5 мкм тиск ударної хвилі не перевищує $2 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^5$ Па. Подальше збільшення амплітуди звукового тиску призводить до значного збільшення амплітуди тиску ударних хвиль і відбувається при сплескуванні кавітаційних бульбашок. При сплескуванні усередині бульбашки створюються великі тиски до 10^9 Па.

За підвищення амплітуди звукового тиску вище деякого критичного значення кавітаційні бульбашки досягають критичних розмірів, при яких відбувається їх виродження в довгоживучі. Такі бульбашки протягом великого числа періодів здійснюють коливання біля своїх максимальних розмірів (більш 100-1000 мкм). Довгоживучі бульбашки практично не сплескуються і, отже, не мають жодного інтенсифікуючого впливу на перебіг технологічних процесів в рідких дисперсних середовищах.

Важливим реологічним параметром, що впливає на стадії протікання процесів кавітації є в'язкість. Якщо при коефіцієнті в'язкості рідини, близькому до в'язкості води ($\mu = 10^{-3}$ Па·с), вплив в'язкості на сплескування кавітаційних бульбашок є незначним, то при коефіцієнті в'язкості 10^{-2} - 10^{-1} Па·с дія в'язких сил вже починає позначатися на поведінці кавітаційних бульбашок.

Вплив в'язкості найбільш сильно проявляється при малих амплітудах акустичного тиску і в першу чергу на бульбашки з невеликими радіусами. В'язкість призводить до того, що бульбашки малого радіусу не сплескуються. Тому в роботі запропоновано у якості основного класифікатора суміші прийняти в'язкість середовища (див. табл. 3.1), інтенсивна обробка яких обумовлена відповідним рівнем граничних значень інтенсивності (табл. 6.4).

Зазначені параметри враховуються в алгоритмах розрахунків.

Акустичні параметри кавітаційного процесу. Основними параметрами, що під дією зовнішніх сил F_0 визивають коливання будь якої системи, в тому числі і кавітаційного апарату, є частота коливань (f , Гц) та амплітуда коливань (A , м). Внаслідок цього в зоні контакту апарату з середовищем, виникає звуковий тиск ($P(t)$, Па) і в середовищі, якщо воно

представляє собою систему з розподіленими параметрами, розповсюджується хвиля зі швидкістю (c , м/с), яка має відповідну довжину звукової хвилі (λ , м).

Таблиця 6.4 – Граничні значення інтенсивності для середовищ різної в'язкості

Показник	Значення							
В'язкість, η , 10^{-3} Па	20	40	80	100	150	250	300	400
Інтенсивність, I_{\min} , Вт/см ²	1,75	2,00	2,45	2,55	3,75	7,50	12,50	16,00
Інтенсивність, I_{\max} , Вт/см ²	4,35	6,00	7,55	7,75	10,35	17,00	21,55	35,00

Енергетичним параметром звукової хвилі прийнято вважати інтенсивність звуку I . Оскільки кавітаційна область зароджується і формується під впливом зовнішнього джерела коливань, то слід перш за все звертати увагу на те, як зміна в часі контактного тиску $P(t)$ ($P(t)=F_0/S$), впливає на динаміку бульбашок. Повторення тут цих, цілком відомих і зрозумілих своєю дією, параметрів акустики f , A , $P(t)$, c , I обумовлено наступними міркуваннями, отриманими в результаті виконаних досліджень (розд. 3–5) та опублікованих в роботах [31, 32]. По перше, повторення, приведеного вище класичного процесу розповсюдження хвиль в середовищі, ідеалізовано. По друге, при розробці та створенні акустичного апарату [34, 38–40, 44], як складового елементу акустичної системи (див. рис. 2.5), як правило, передбачається [51] зведення до зони контакту із технологічним середовищем числових значень певних параметрів, що мають забезпечити інтенсивність, частоту передачі енергії до середовища. Але цього недостатньо для гарантованої реалізації ефективного протікання процесу кавітації.

В дійсності, будь-яке середовище, сприймаючи той чи інший рівень енергії, реагує по різному. Реакція середовища на вплив синусоїдальної сили не є гармонійною, оскільки середовище, ставши дисперсним, є нелінійним і стає носієм різних, за реологічними властивостями, характеристик. Таке середовище володіє своєю динамічною індивідуальністю, вираженою власною частотою коливань. Адже саме наявність субгармонік або супергармонік є характерною рисою нелінійності системи. Не врахування дисипативної складової у визначенні резонансної частоти може привести до недостовірних результатів.

Тому, для встановлення істинної картини кавітаційного процесу, утворення області (кластеру) бульбашок, нижче наведені дослідження зміни акустичних параметрів зі зміною властивостей середовища (табл. 6.5, 6.6).

Таблиця 6.5 – Залежність між амплітудою коливань, в'язкістю та максимальним радіусом бульбашки

Показник	Значення		
Амплітуда коливань, мкм	4,0	12,0	20,0
В'язкість, 10^{-3} Па*с	1,0	30,0	50,0
Максимальний радіус бульбашки, мкм	35,0	48,0	60,0
Поверхневий натяг бульбашки, 10^{-3} Н/м	1	72	150

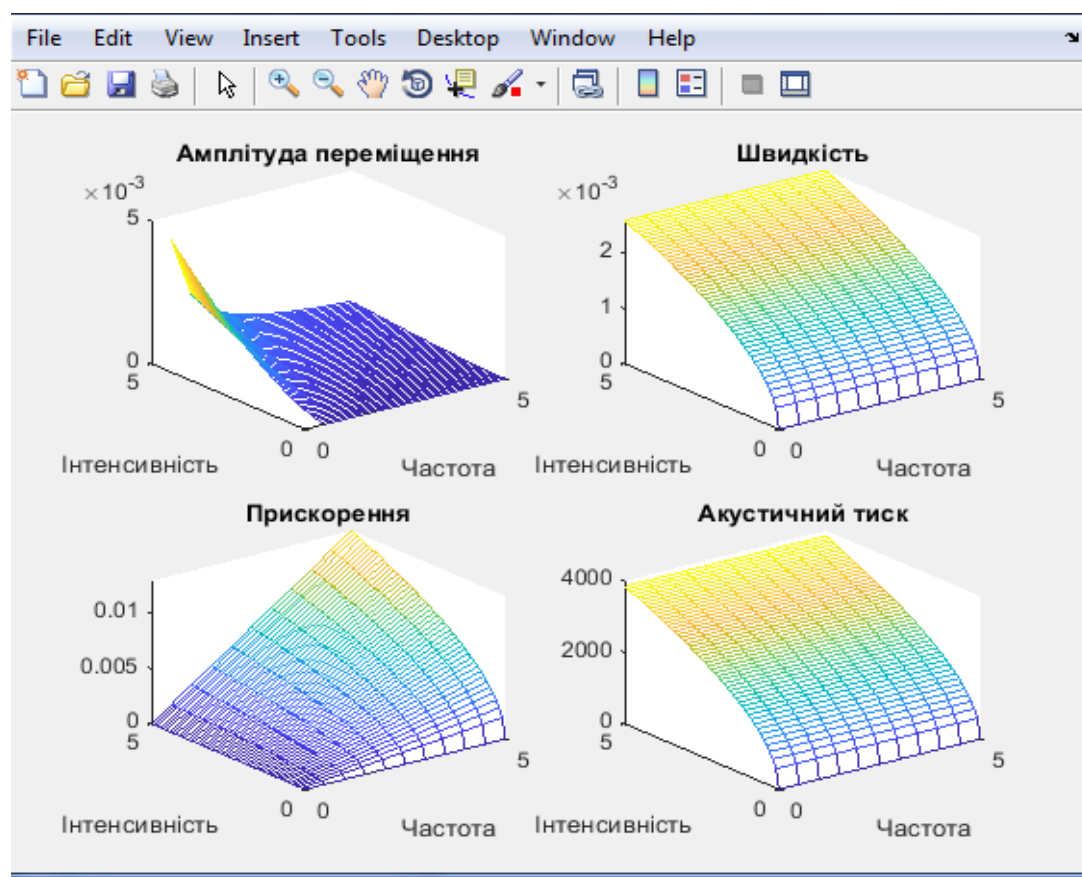
Ці значення являються вихідною інформацією для визначення наступних параметрів кавітаційного процесу.

Таблиця 6.6 – Залежність максимального радіуса кавітаційних
бульбашок від величини звукового тиску

Показник	Значення					
Величина звукового тиску, 10^3 Па	500	1000	1500	2000	2500	3000
Відношення радіусів бульбашки, R_{\max}/R_0	160	270	350	420	460	520

6.3 Аналіз результатів встановлення зміни параметрів акустичного процесу обробки технологічних середовищ

За здійсненими дослідженнями (п. 5.2 та 5.3) отримані аналітичні залежності, які дали можливість визначити амплітуди коливань кавітатора та динамічного тиску в зоні контакту та середовищі на основі корпускулярної (п. 5.2) та континуальної (п. 5.3) моделей робочого кавітаційного процесу обробки технологічного середовища. Отримані вирази (5.100–5.114) дозволяють розрахувати амплітуду коливань, як в середовищі, так і в контактній зоні або по заданій амплітуді призначати необхідні параметри кавітаційного процесу. За допомогою вказаних формул представляється можливим визначити зони посилення або ослаблення амплітуди коливань для різних частот коливань, а також розрахувати напруження (5.116) в будь якому шарі технологічного середовища. Здійснений комп'ютерний експеримент (п. 5.5.2) дозволив вирішити задачу щодо оцінки достовірності прийнятих фізичних і математичних моделей. За виявленими реологічними властивостями середовищ були знайдені числові значення амплітуд коливань (пряма задача), а потім за знаними величинами акустичних характеристик і амплітуд коливань визначали пружні, інерційні та дисипативні характеристики (зворотна задача). Надалі за залежностями (6.8) – (6.13) була складена програма (рис. 6.2) для визначення ступені зміни амплітуд переміщення, швидкості, прискорення та їхніх градієнтів.



Входные данные		Расчетные			
c=	1500	скорость распространения упругой	w=	138230	угловая
f=	22000	частота	T=	4.54545	период
lambda	0.068	длина волны	A=	0.00841	амплитуда смещения частиц в клетке
rho=	985	плотность	vm=	0.11634	амплитуда скорости частиц в клетке
eta=	0.82E-3	вязкость	a=	16082.5	амплитуда ускорения частиц в клетке
sigma=	73.0E-3	поверхностное	P=	171901	акустическое давление частиц
I=	1E4	интенсивность ультразвуковой			
Dk=	5E-4	диаметр			
Построение					
Диапазон частот		начальное	0	шаг	0.5
		конечное	5		
Диапазон интенсивности волны		начальное	0	шаг	0.1
		конечное	5		
Расчет		Построить граф...			

Рисунок 6.2 – Вікно програми розрахунку акустичних параметрів

1. Амплітуда переміщення:

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}, \quad A = A(\omega, I, \rho, c), \quad (6.8)$$

$$\text{grad}A = \left(-\frac{1}{\omega^2} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}; \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{1}{2I\rho c}}; -\frac{1}{\omega\rho} \sqrt{\frac{I}{2\rho c}}; -\frac{1}{\omega c} \sqrt{\frac{I}{2\rho c}} \right). \quad (6.9)$$

2. Амплітуда швидкості частинок, що коливаються:

$$v = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}, \quad v = v(\omega, I, \rho, c), \quad (6.10)$$

$$\text{grad}v = \left(0; \sqrt{\frac{1}{2I\rho c}}; -\frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{I}{2\rho c}}; -\frac{1}{c} \sqrt{\frac{I}{2\rho c}} \right). \quad (6.11)$$

3. Амплітуда прискорення частинок:

$$a = \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}, \quad a = a(\omega, I, \rho, c), \quad (6.12)$$

$$\text{grad}a = \left(\sqrt{\frac{2I}{\rho c}}; \omega \sqrt{\frac{1}{2I\rho c}}; -\omega \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{I}{2\rho c}}; -\omega \frac{1}{c} \sqrt{\frac{I}{2\rho c}} \right). \quad (6.13)$$

Вихідні параметри та їх зміна у часі наведена в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Вихідні параметри програми

Густина середовища $\rho, \text{ кг/м}^3$	Швидкість хвиль, $c, \text{ м/с}$	Частота коливань, $f, \text{ кГц}$	Інтенсивність, $I, \text{ Вт/см}^2$	В'язкість середовища, $\beta, 10^{-3} \text{ Па*с}$	Поверхневий натяг, $\sigma, 10^{-3} \text{ Н/м}$
1000 – 600	1500 – 20	20 – 40	1,5 – 50,0	10 – 200	70 – 25

До вхідних параметрів відноситься і радіус бульбашок, значення якого приймалося в залежності від стадій кавітації: початкова (однофазне середовище), зародження, розвиток, сплескування (двофазне середовище).

Результати розрахунків для одного із характерних варіантів наведені в табл. 6.8.

Таблиця 6.8 – Розрахункові значення амплітуд переміщення, швидкості, прискорення та тиску

№	Щільність середовища $\rho, \text{кг/м}^3$	Швидкість, розповсюдж. хвиль в середовищі, $c, \text{м/с}$	Довжина хвилі, λ	Ампл. коливань, $A \cdot 10^{-2}$ мкм	Ампл. швидк., $V \cdot 10^{-3} \text{м/с}$	Ампл. прискор., $a \cdot 10^{-3} \text{м/с}^2$	Тиск, $p \cdot 10^3, \text{Па}$
1	985	1500	0.068	0,841	116,340	160,825	171,901
2	850	1000	0.045	1.109	153,390	212,035	130,384
3	750	500	0.022	1,670	230,940	319,229	866,025
4	700	400	0.018	1,933	267,600	369,435	748,331
5	650	300	0.014	2,316	320,250	442,691	624,500
6	650	200	0.009	2,837	392,230	542,183	509,902
7	600	100	0.0045	4,176	571,360	798,072	346,410
8	600	50	0.0022	5,906	816,490	1128,640	244,949
9	600	30	0.0013	7,625	1954,090	145,707	189,737

Якісна картина зміни амплітуд коливань, швидкості, прискорення, акустичного тиску та їх градієнтів приведена на рис. 6.3 – 6.7.

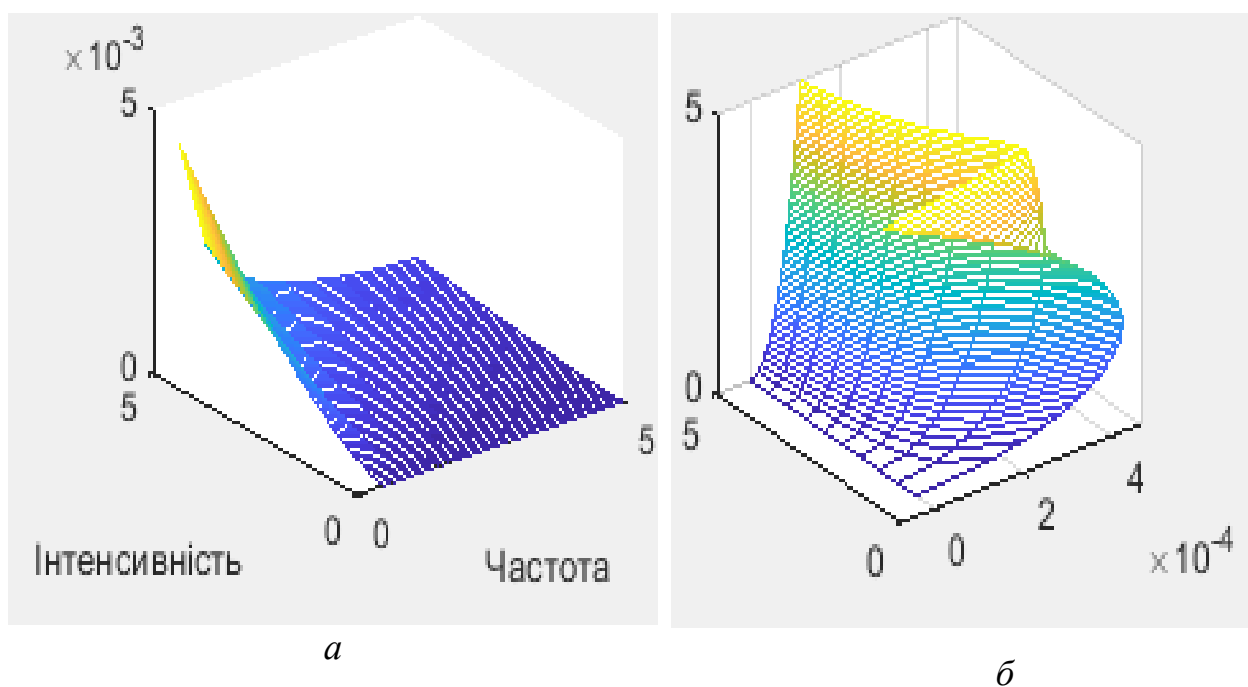


Рисунок 6.3 – Графіки зміни амплітуд коливань (*a*)
та їх градієнтів(*б*)

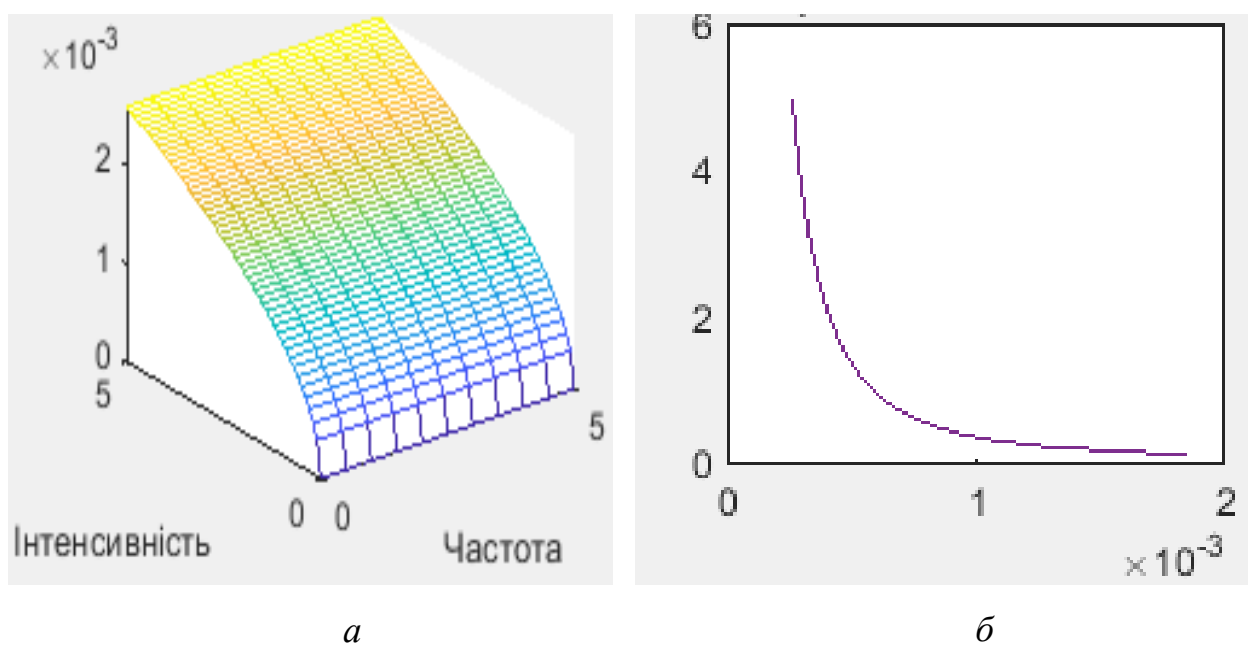


Рисунок – 6.4 Графіки зміни швидкості коливань (*a*)
та їх градієнтів(*б*)

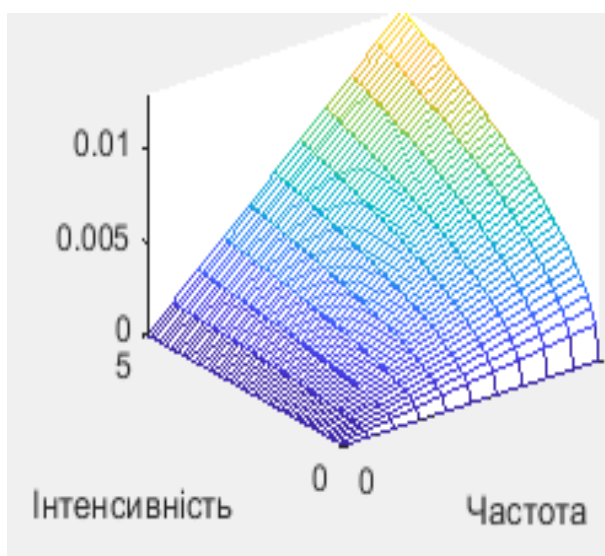
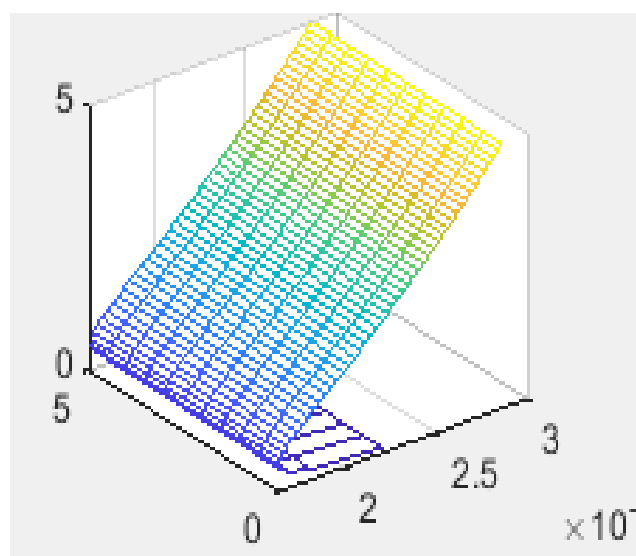
*a**б*

Рисунок 6.5 – Графіки зміни прискорення коливань (*a*) та їх градієнтів(*б*)

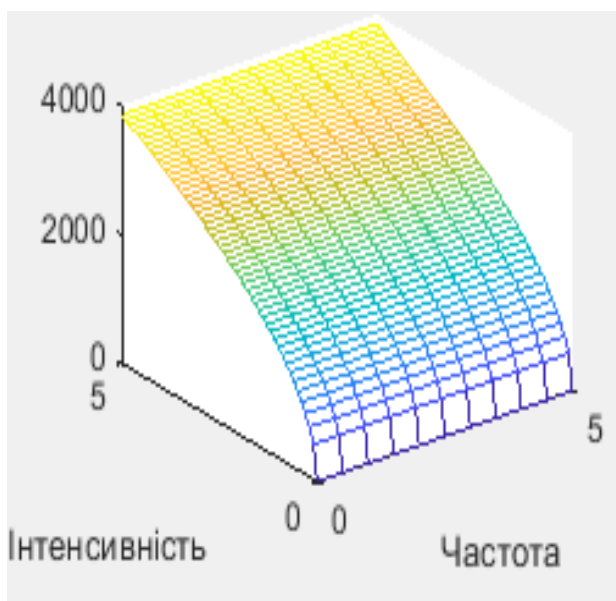
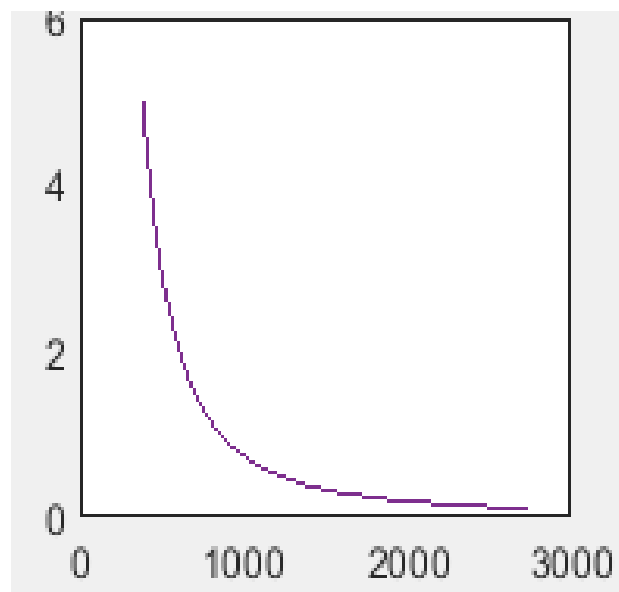
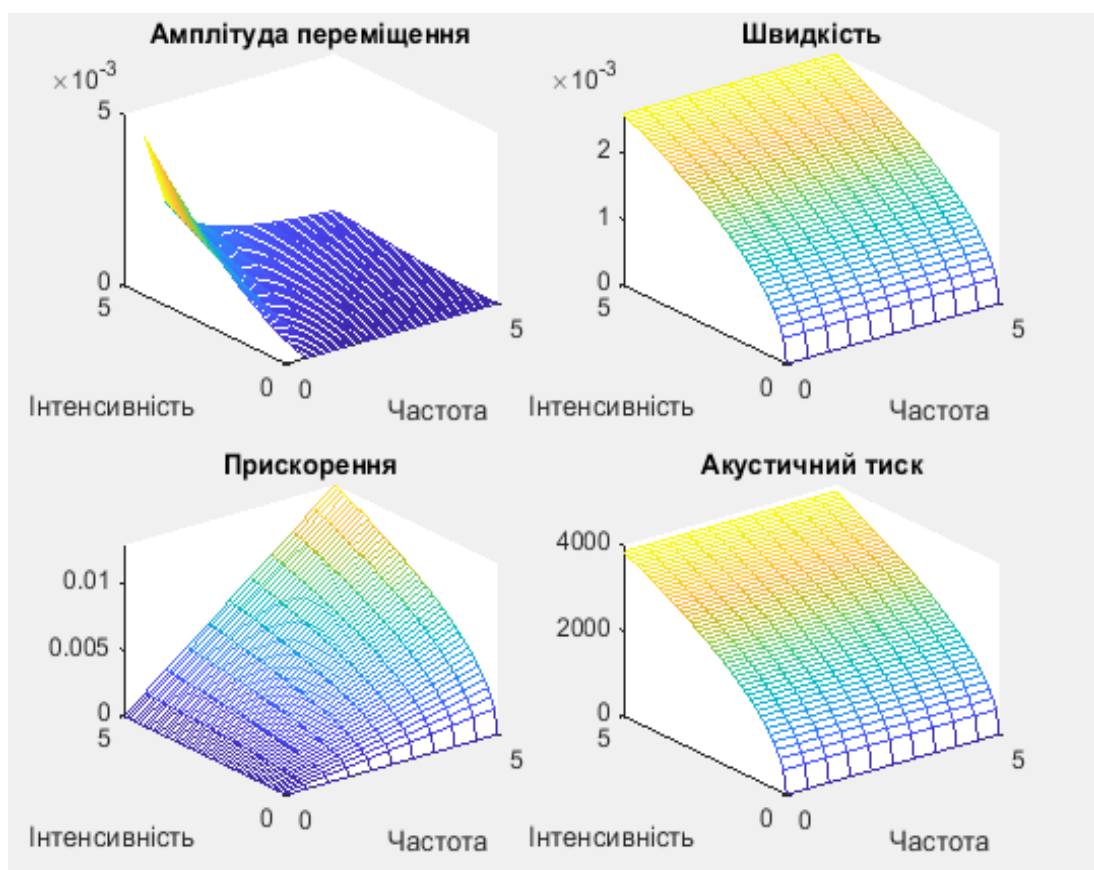
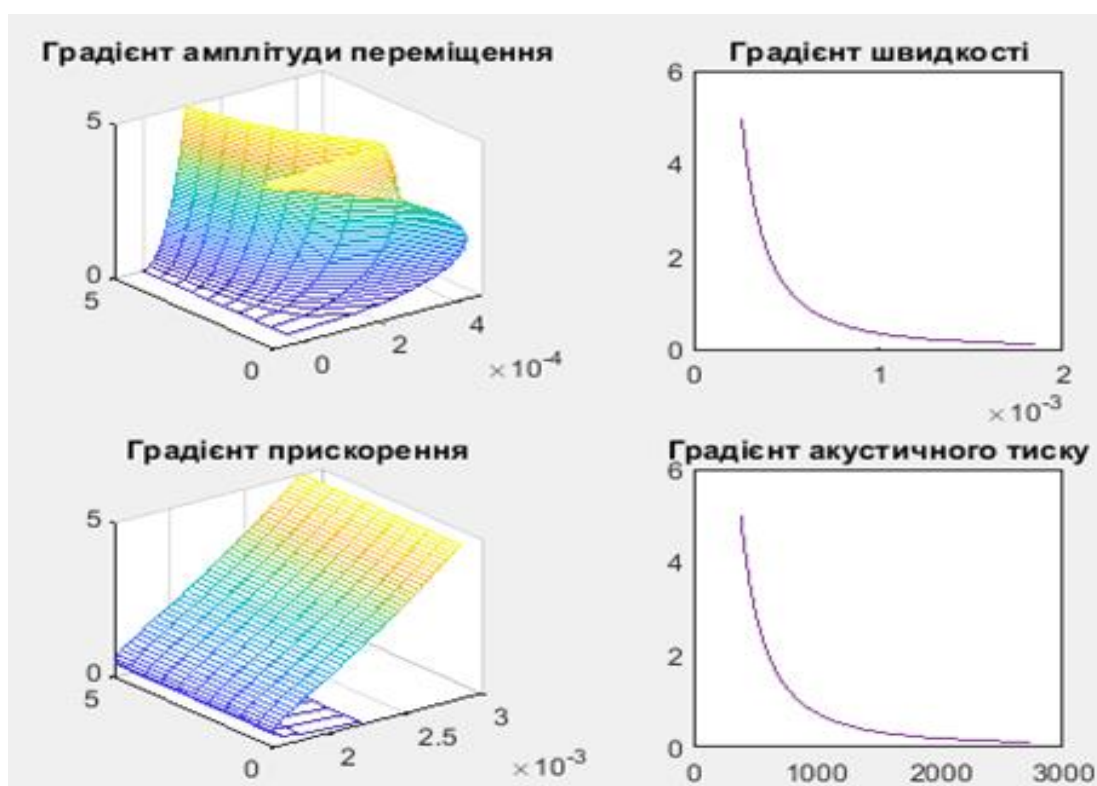
*a**б*

Рисунок 6.6 – Графіки зміни акустичного тиску (*a*) та їх градієнтів(*б*)

За числовими значеннями таблиці 6.7 та наведених графіків (рис. 6.3 - 6.6) виявляли закономірність зміни амплітуд, швидкостей, прискорень коливань, акустичних тисків та їх градієнтів при зміні щільності середовища, швидкості розповсюдження хвиль та довжини хвилі.



а



б

Рисунок 6.7 – Графіки зміни амплітуд переміщення, швидкості, прискорення, тиску (а) та їхніх градієнтів(б)

Підтверджена гіпотеза значної зміни амплітуди коливань за числовими значеннями в процесі зміни стадій кавітаційної обробки води. Ці визначення були зроблені за умови стабілізації числових значень інтенсивності, що засвідчує необхідність розробки системи управління процесом за багатофункціональними змінами параметрів з певною, наперед заданою, програмою контролю та адаптацією до конкретного складу технологічного середовища. Цей висновок наглядно підтверджує приведений спільний графік зміни амплітуд переміщення, швидкості, прискорення, тиску та їхніх градієнтів (рис. 6.7).

Окрім цих параметрів важливим елементом розробки нових та вдосконалення існуючих кавітаційних апаратів є режим обробки технологічного середовища. Очевидним та найбільш ефективним режимом ультразвукової кавітаційної обробки технологічного середовища для будь якого процесу із енергетичної точки зору є резонансний. Складність визначення такого режиму полягає у отриманні достовірної інформації щодо визначенні наявної кавітаційної області бульбашок, в якій вони одночасно сплескуються. Фактично для визначення резонансної частоти розглядають коливання однієї бульбашки, моделюючи її системою із однією ступеню волі [84]. Віддаючи належне резонансному режиму, розглянемо в послідовному викладені методики визначення резонансної частоти бульбашки, а потім і всієї області у вигляді певного кластеру, який відтворює процедуру взаємодії бульбашок між собою та з акустичними хвилями стискування і розрідження в тому чи іншому вигляді.

6.4. Методика визначення власної та резонансної частоти коливань бульбашки та кавітаційної області

Резонансна частота являється не тільки параметром, що забезпечує енергоощадність процесу, а і характеристикою, яка суттєво впливає на прискорення протікання обробки технологічного середовища. Тому

визначення резонансної частоти привертає увагу дослідників кавітаційного процесу. Застосовуються дві моделі визначення резонансної частоти шляхом врахування дискретними або розподіленими (континуальними) параметрами.

6.4.1 Дискретна модель

За дискретною моделлю розглядається рух окремо взятої бульбашки у вигляді рівняння з одним ступенем волі [84]. Щоби оцінити цю модель в частині визначення резонансної частоти, варто розглянути процедуру за відповідною послідовністю рішення такого рівняння. В загальному вигляді таке рівняння має вигляд [185, 186]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F(t), \quad (6.14)$$

де, m , b , c – маса, коефіцієнт демпфування, коефіцієнт пружності, відповідно; x , \dot{x} , \ddot{x} – переміщення, швидкість та прискорення, відповідно; F , t – зовнішня сила та потоковий час.

Вирази рішення рівняння (6.14) відносно амплітуди сталих коливань x_0 , амплітуди коливань в резонансі x_{0p} , амплітуди коливань в зарезонансі x_{0zp} , фазового кута α , коефіцієнта демпфування b , власної частоти коливань $\omega_{вл}$, резонансної частоти коливань ω_0 , коефіцієнта динамічності λ_1 мають вигляд:

$$x_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(c - m\omega^2)^2 + (b\omega)^2}}; \quad x_{0p} = \frac{F_0}{b\omega}; \quad x_{0zp} = \frac{F_0}{m\omega^2}; \quad (6.15)$$

$$\alpha = \arctg \left\{ \frac{b\omega}{c - m\omega^2} \right\}; \quad b = \frac{2\delta m}{T}; \quad (6.16)$$

$$\omega_{вл} = \sqrt{\frac{c}{m} - \left(\frac{bt}{2m}\right)^2}; \quad \omega_0 = \sqrt{c/m}; \quad \lambda_1 = \frac{1}{1 - (\omega/\omega_0)^2}. \quad (6.17)$$

Наведені залежності (6.15) засвідчують важливість врахування

демпфування у виразах амплітуд коливань. Виключенням є формула для зарезонансного режиму коливань, що для кавітаційного процесу не є прийнятною. Підтвердженням важливості врахування демпфування є графік амплітудно-частотної характеристики (рис. 6.8).

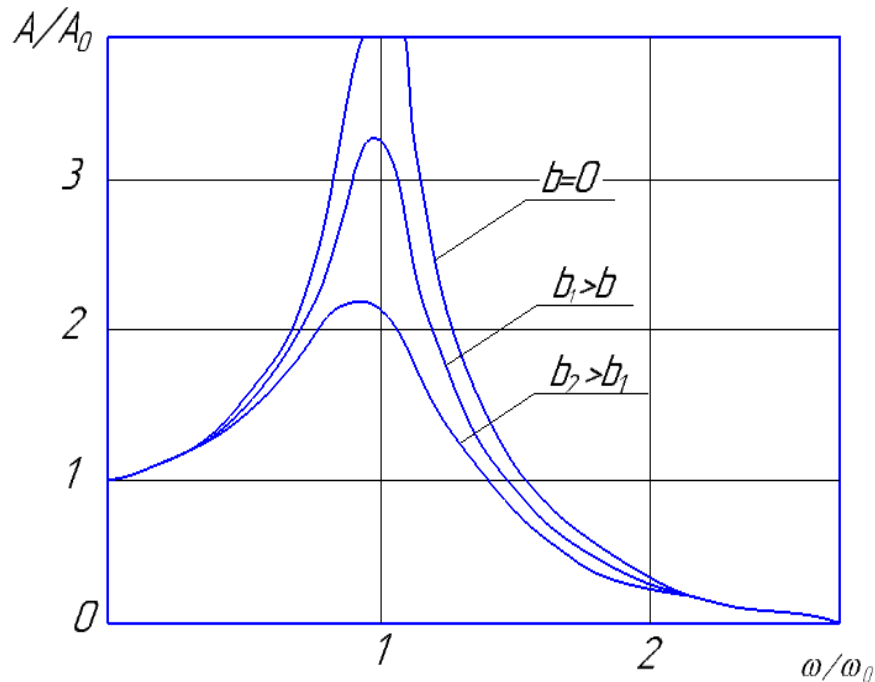


Рисунок 6.8 – Амплітудно-частотна характеристика динамічної системи з одним ступенем волі

Із приведенного графіка слідує, що криві зміни амплітуди коливань завжди лежать нижче графіка амплітуди коливань за умови, що $b=0$. Особливість таких кривих складається іще в тім, що їхній резонанс настає трохи раніше збігу частот $\omega = \omega_0$, тому що частота власних коливань із загасанням $\omega_{вл}$ трохи менше резонансної частоти ω_0 відповідно до формули (6.17). І іще один дуже важливий висновок. Якщо в дійсності намагатися забезпечити резонансний режим, варто враховувати, як впливає розсіювання енергії на величину амплітуди коливань, яка є ключовим параметром інтенсивності (див. табл. 6.2).

Тепер зупинимось на трансформації рівняння (6.14) до опису руху однієї бульбашки в кавітаційній області:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = P_{ak}(4\pi R_0^2). \quad (6.18)$$

Рівняння (6.18) було у свій час використано Міннертом [62] для визначення резонансної частоти коливання бульбашки за умови, що коефіцієнт демпфування $b=0$, а маса бульбашки m та коефіцієнт її пружності c визначалися за залежностями:

$$m = 4\pi R_0^3 \rho ; \quad c = 12\pi\gamma R_0 \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right), \quad (6.19)$$

де ρ – щільність бульбашки, R_0 – розмір бульбашки, p_0 – амплітуда тиску, σ – поверхневий натяг.

Зовнішня сила $F(t)$ була представлена у вигляді:

$$F(t) = p_{ak}(4\pi R_0^2), \quad (6.20)$$

де p_{ak} – акустичний тиск, який змінюється у часі t за законом:

$$p_{ak} = p_0 \cos \omega t. \quad (6.21)$$

Використовуючи відому формулу для резонансної частоти одномасної системи $\omega_0 = \sqrt{c/m}$, підстановкою в нею значень c і m із (6.19), була отримана Міннертом залежність для визначення резонансної частоти:

$$\omega_0 \cong \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{3\gamma(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0})}{\rho}}. \quad (6.22)$$

Варто зазначити, що формула (6.22) отримана для лінійного уявлення процесу руху бульбашки і не враховує зміни пружних властивостей бульбашки, її нелінійної пульсації. Важливо визначити значення амплітуди коливань бульбашки за прийнятими вище допущеннями і передмовами.

Якщо вважати, що переміщення бульбашки здійснюється за законом

$$x = A_0 \cos(\omega t + \alpha), \quad (6.23)$$

то в результаті підстановки (6.23) у рівняння (6.18) із урахуванням (6.19)

отримаємо вираз для визначення амплітуди коливань бульбашки A_0 :

$$A = \frac{P_{am}(4\pi R_0^2)}{[12\pi\gamma R_0(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0})] - (\omega^2 4\pi R_0^3 \rho)}. \quad (6.24)$$

Формулу для визначення амплітуди коливань бульбашки (6.24) можна представити у вигляді:

$$A = A_0 k_\partial, \quad (6.25)$$

де A_0 – амплітуда коливань бульбашки в зоні контакту кавітатора з технологічним середовищем, k_∂ – динамічний коефіцієнт підсилення коливань бульбашки:

$$k_\partial = \left[\frac{1}{1 - \Omega^2} \right]. \quad (6.26)$$

Тут $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$; ω_0 – резонансна частота коливань бульбашки.

Для резонансного режиму коливань бульбашки має виконуватися наступна умова:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} = 1, \quad (6.27)$$

а коефіцієнт динамічності k_∂ , як це слідує із залежності (6.27) матиме вигляд:

$$k_\partial = \frac{1}{0} \rightarrow \infty \quad (6.28)$$

Амплітуда коливань бульбашки представлена залежністю (6.24) в резонансі прагне в безкінечність. Отже, отримані залежності засвідчують, що неврахування розсіювання енергії в рівняннях руху бульбашки приводять до у неможливості точно відобразити резонансний режим. Тому врахування розсіювання енергії у формулі для власної частоти коливань ω_{vl} є необхідною умовою для гарантованого забезпечення резонансного режиму. З цією метою використана формула, в якій враховані пружні (c_{np}) та дисипативні (δ_{np}) властивості бульбашки :

$$\omega_{вл} = \sqrt{\left[\frac{3\gamma}{\rho R_0^2} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + \frac{2c_{np}}{\rho R_0^3} \right] - \left(\frac{2\pi\delta_{np}}{\omega} \right)^2}. \quad (6.29)$$

В таблиці 6.9 наведені числові значення відношення амплітуд коливань бульбашки в залежності від коефіцієнта демпфірування для різних відношень частот коливань, а на рис. 6.9 приведена амплітудно-частотна характеристика руху бульбашки за результатами цих даних.

Таблиця 6.9 – Числові значення відношення амплітуд коливань бульбашки в залежності від коефіцієнта демпфірування для різних відношень частот коливань

№	Коефіцієнт демпфірування, b	Відношення частот коливань, ω / ω_0		Відношення амплітуд коливань, A/A_0	
1	0,005	1.1	0,75	1.1	2,25
		1.2	1,0	1.2	∞
		1.3	1,5	1.3	0.85
2	0,10	2.1	0,75	2.1	2.20
		2.2	1,0	2.2	10.00
		2.3	1,5	2.3	0.92
3	0,15	3.1	0,75	3.1	2.17
		3.2	1,0	3.2	6.75
		3.3	1,5	3.3	0.90
4	0,20	4.1	0,75	4.1	2.11
		4.2	1,0	4.2	4.85
		4.3	1,5	4.3	0.85
5	0,30	5.1	0,75	5.1	1.80
		5.2	1,0	5.2	2.00
		5.3	1,5	5.3	0.67

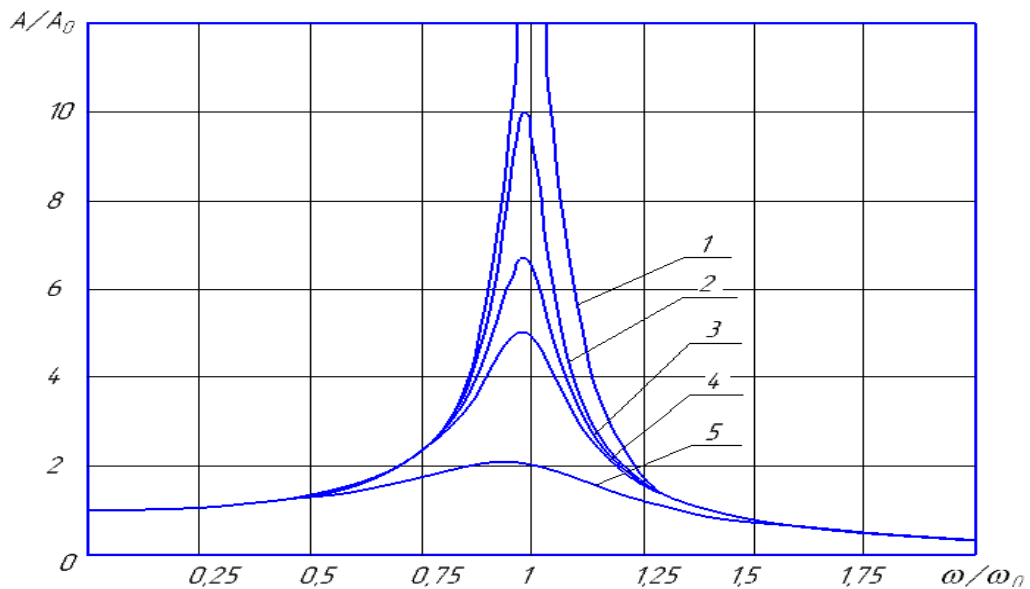


Рис. 6.9. Амплітудно-частотна характеристика руху бульбашки в залежності від співвідношення вимушеної і власної частот при зміні коефіцієнта демпфування.

6.4.2. Континуальна модель

За континуальною моделлю знаходження аналітичної залежності для визначення власної частоти коливань бульбашки використаємо хвильове рівняння (5.25):

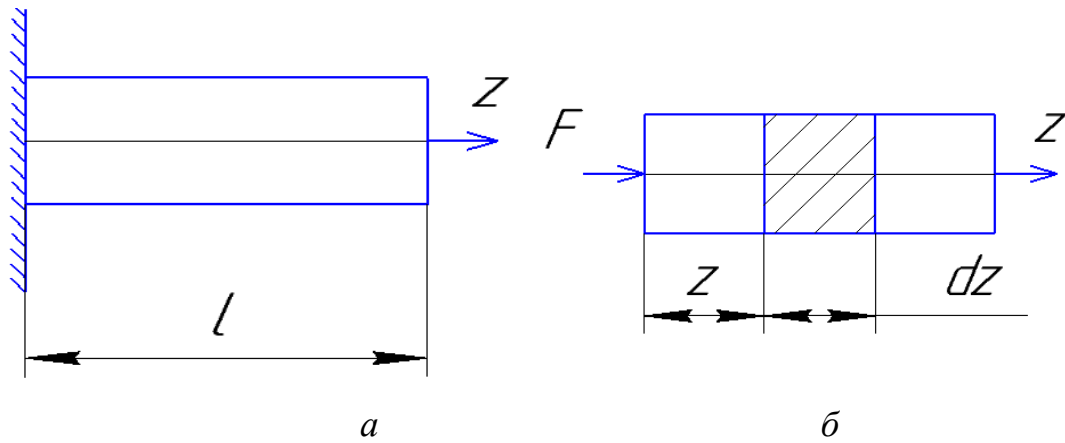
$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}, \quad (6.30)$$

де $c = \sqrt{E/\rho}$ – швидкість поширення хвиль; $x(z, t)$ – переміщення в точці z в момент t щодо початкового положення. Для визначення власної частоти $\omega_{вл}$ знаходяться коефіцієнти A, B частотного рівняння (6.31) для конкретних граничних умов:

$$x(z) = A \cos \frac{\omega_{вл}}{c} z + B \sin \frac{\omega_{вл}}{c} z. \quad (6.31)$$

Це рівняння завжди трансцендентне і на відміну від дискретних систем має нескінченне число коренів, тобто нескінченне число власних частот.

Розглянемо граничні умови для схеми (рис.6.10, а) і визначимо для цієї схеми власну частоту.



a – схема для визначення власної частоти; b – схема дії сили на систему

Рисунок 6.10 – Розрахункова схема системи з розподіленими параметрами

Так, у кінцевому перерізі $z = 0$ переміщення повинно дорівнювати нулю.

Тоді $x = 0$. На вільному кінці $z = l$ поздовжня сила $F_l = 0$, що можливо за умови $\dot{x} = 0$. Тобто матимемо:

$$x(0)_{z=0} = 0; \left(\frac{dx}{dz} \right)_{z=l} = 0.$$

Підставимо ці граничні умови у рівняння (6.31) та отримаємо:

$$A = 0; B \frac{\omega_{\text{вл}}}{c} \cos \omega_{\text{вл}} \frac{l}{c} = 0. \quad (6.32)$$

Параметр B може мати будь-яке значення за виключенням нуля. Тоді частота може бути найдена з умови, що

$$\cos \omega_{\text{вл}} \frac{l}{c} = 0.$$

Це трансцендентне рівняння має нескінченну множину частот:

$$\omega_{\text{вл}} = \frac{\pi c}{2l} (2n - 1), \quad (6.33)$$

де $n = 1, 2, \dots, n$.

Наприклад, для першої гармоніки ($n = 1$):

$$\omega_{\text{вл}} = \frac{\pi c}{2l} = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (6.34)$$

Ця формула отримана при певних передумовах, що бульбашка є вільною від взаємодії з іншими бульбашками, відсутністю впливу ультразвукового перетворювача, окрім сили F_l . Тобто формула (6.34) за структурою та функціональною визначеністю є достовірною в рамках прийнятих граничних умов. Її реальне застосування потребує уточнення ключових параметрів: модуля пружності та щільності бульбашки – їхнього стану, залежності та числових значень на конкретному етапі стадій протікання процесу кавітації і геометричної характеристики, якою є довжина l , в напрямку якої розповсюджується хвиля. Тому для врахування зміни властивостей середовища від однорідного на початковій стадії до появи кавітаційних бульбашок варто розглядати як нове середовище із змінними у часі параметрами. Тоді застосування формули (6.33) потребує корекції, яка може трансформована до виду:

$$\omega_{вл} = \frac{\pi}{2l}(2n-1)\sqrt{\frac{(E' + iE'')(t_c)}{\rho(t_c)}}, \quad (6.35)$$

де t_c – час, що визначає період протікання тої чи іншої стадії обробки технологічного середовища; i – мнима одиниця; E', E'' – дійсна і мнима частина комплексного модуля пружності, які визначаються за формулами:

$$E' = \frac{\left(1 - \alpha^2 c_\kappa^2 / \omega^2\right) \rho_\kappa c_\kappa^2}{\left(1 + \alpha^2 c_\kappa^2 / \omega^2\right)^2}; \quad E'' = \frac{2 \rho_\kappa c_\kappa^2 \alpha c_\kappa / \omega}{\left[1 + \left(\alpha c_\kappa / \omega\right)^2\right]^2}; \quad (6.36)$$

В (6.36) коефіцієнт поглинання енергій в середовищі α визначається за залежністю:

$$\alpha = \sqrt{\frac{(\varphi + 1) \rho \omega^2}{2 \varphi^2 E'}}, \quad (6.37)$$

де фазовий кут $\varphi = E'' / E'$. Із наведених формул випливає, що вимірюючи швидкість розповсюдження хвиль c_κ і коефіцієнт поглинання α , можемо вичислити комплексний модуль пружності. При малому коефіцієнті

поглинання енергії (мало в'язких середовищ) $(\alpha^2 c_{\kappa}^2 / \omega^2 \ll 1)$ вираз (6.36)

можна спростити:

$$E' = \rho_{\kappa} c_{\kappa}^2; E'' = 2\rho_{\kappa} c_{\kappa}^2 \alpha c_{\kappa} / \omega. \quad (6.38)$$

Таким же чином можна здійснити подібне перетворення формули визначення власної частоти коливань спільної системи «ультразвуковий перетворювач – середовище» (5.113) при розташуванні кавітатора над оброблювальним середовищем:

$$\omega_{\text{вл}} = \sqrt{\frac{E_c S_{\kappa}}{h_c (M_{y.n.} + (\rho_c S h) / 3)}}. \quad (6.39)$$

Резонансна частота ω_0 за дискретною моделлю визначається за формулою (6.17), яка трансформована Міннертом у формулу (6.22). Як вже з'ясовано, більш уточненою для визначення резонансної частоти ω_0 може бути використана формула (6.29) за умови, що параметр демпфірування $\delta_{np} = 0$:

$$\omega_0 = \sqrt{\left[\frac{3\gamma}{\rho R_0^2} (P_0 + \frac{2\sigma}{R_0}) - \frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + \frac{2c_{np}}{\rho R_0^3} \right]}. \quad (6.40)$$

Резонансна частота ω_0 за континуальною моделлю визначається за формулою (6.35). Отримані залежності (6.33) та (6.40) використані в алгоритмах для визначення відповідних параметрів кавітаційного апарату.

6.5. Методики та алгоритми визначення параметрів робочого процесу обробки технологічних середовищ

6.5.1. Алгоритми визначення параметрів

Для здійснення розрахунків параметрів ультразвукової кавітаційної системи «кавітатор – технологічне середовище» було розроблено ряд алгоритмів (рис. 6.11 – 6.13).

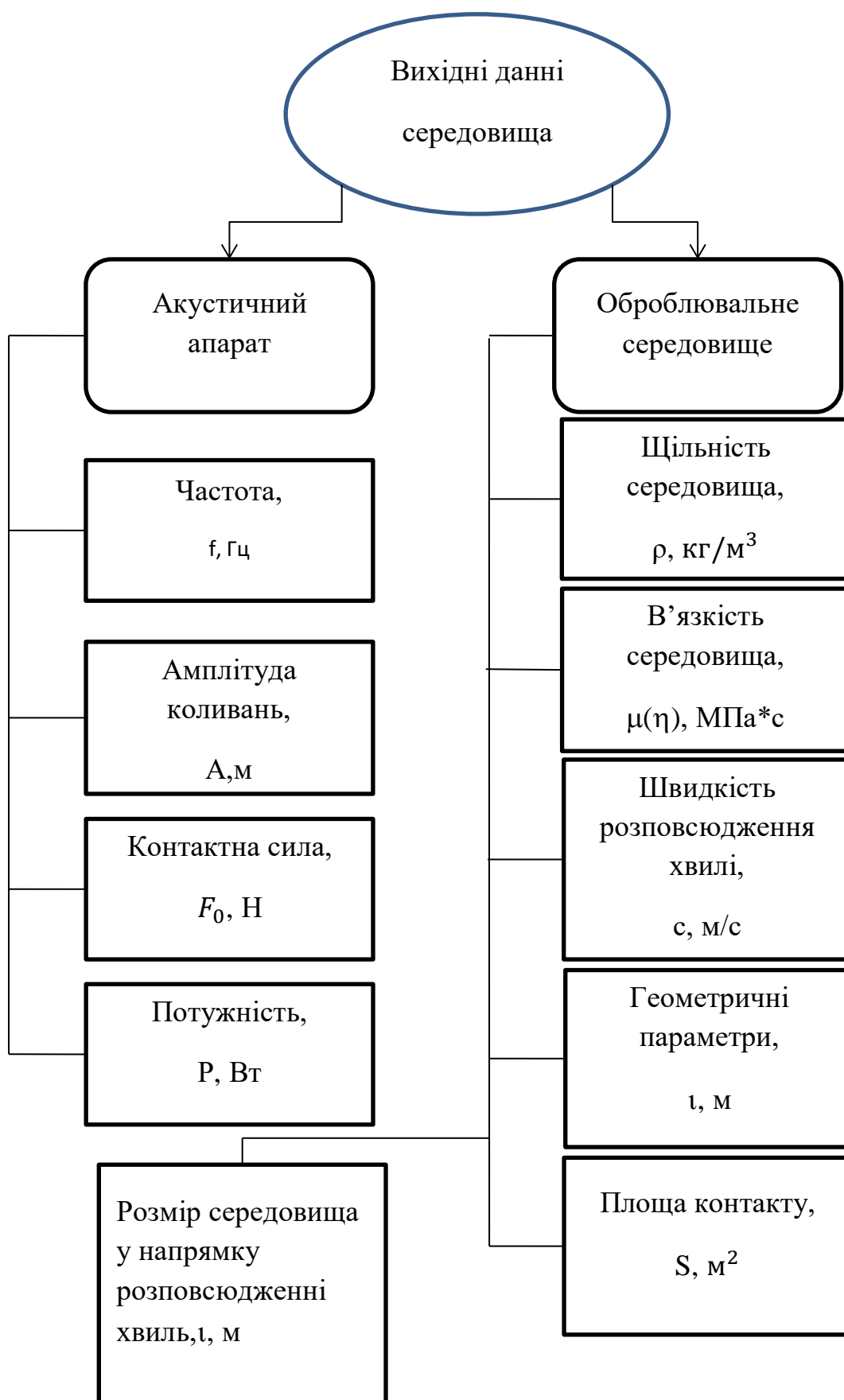


Рисунок 6.11 – Вихідні параметри, що використовуються для розрахунку системи «кавітатор - технологічне середовище»

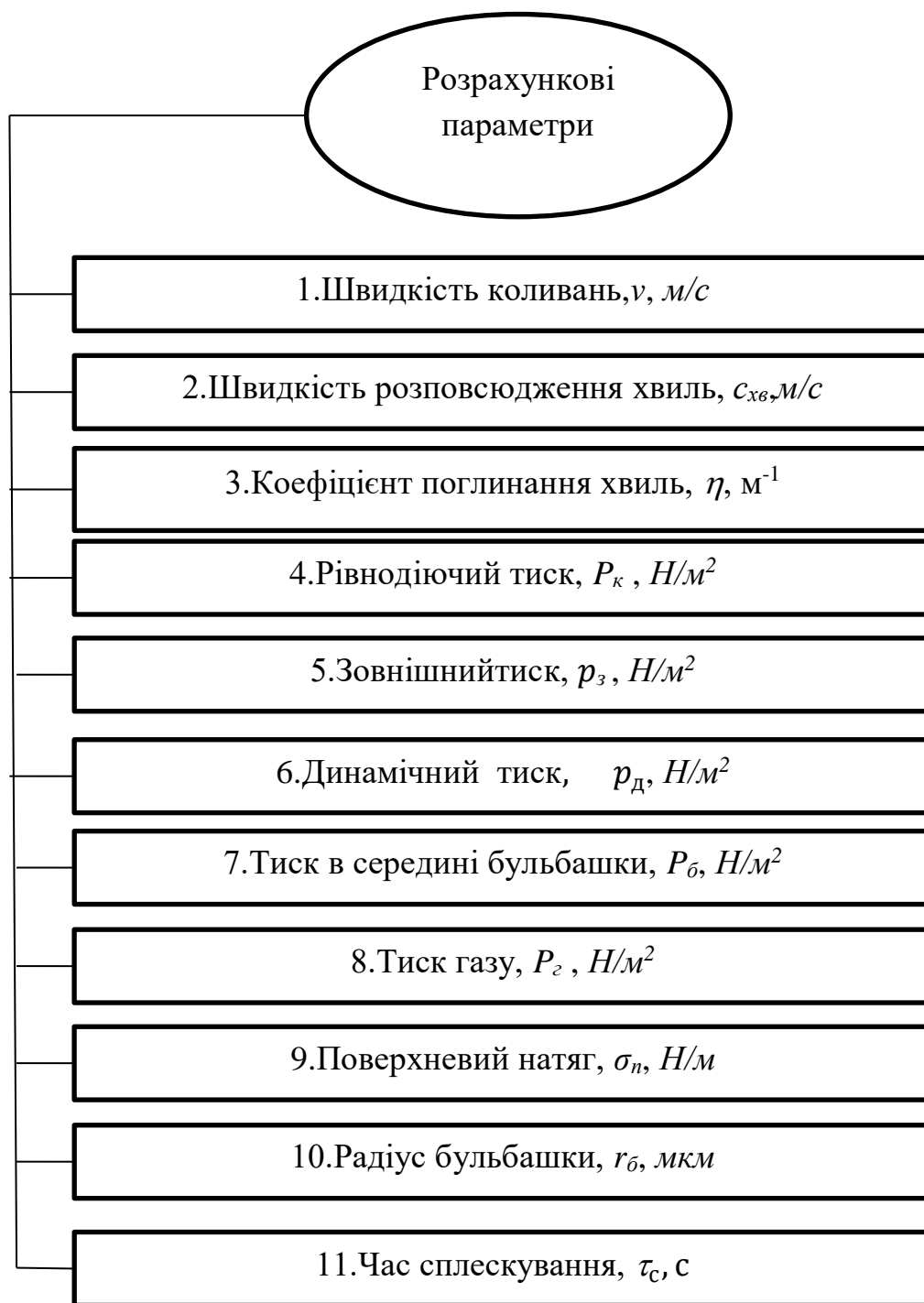


Рисунок 6.12 – Розрахункові параметри ультразвукової кавітаційної системи «кавітатор – технологічне середовище»



Рисунок 6.13 – Алгоритм розрахунку параметрів процесу
ультразвукової кавітаційної системи «кавітатор – технологічне середовище»

6.5.2 Методика використання алгоритмів

Загальна інформація. Вихідні параметри (алгоритм, рис. 6.11), що використовуються для розрахунку, формуються в залежності від конкретного технологічного процесу обробки чи створення нового технологічного середовища. Першим кроком процесу вибору вихідних параметрів є обґрунтування загальної схеми структурно-параметричної системи «акустичний апарат – технологічне середовище» (див. рис. 6.1) та можливого режиму дії перетворювача на середовище. Вибрана за алгоритмом структурно – параметрична схема (блоки 2–4, див. рис. 6.1) потребує конкретизації граничних значень параметрів (блок 6, див. рис. 6.1) та вибір математичної моделі системи «К – С». (блок 5, див. рис. 6.1). Сутність стадій процесу визначається моделями (див. рис. 5.1). Вибір розташування перетворювача знизу (див. рис. 5.5) або зверху (див. рис. 5.7) з відповідними граничними умовами є вихідною інформацією для визначення рівнянь руху загальної ультразвукової системи. Це можуть бути рівняння руху за дискретною моделлю (5.5), (5.17) або за континуальною моделлю з частото залежним розсіянням енергії (5.24) чи з частото незалежним розсіянням енергії (5.55). Наступним кроком є вибір критерію, які наведені в табл. 6.2 та формуються в блоках розрахунку 8, 9 (див. рис. 6.1). Параметри (рис. 6.11) являються вихідною інформацією для визначення числових значень параметрів (рис. 6.12).

Швидкість та амплітуда коливання. Швидкість коливань перетворювача та швидкість коливань бульбашки є важливими характеристиками технологічного процесу. Швидкість перетворювача, v_k визначається виходячи із уявлень про значення інтенсивності на вході в середовище, контактного тиску в контактній зоні та потужності. Швидкість коливань бульбашки, v_b за своїм числовим значенням є похідною від переміщення бульбашки у відповідний момент протікання технологічного процесу(стадії процесу) за умови незмінної частоти коливань бульбашок. Стандартне визначення $v=A_{c.n}*\omega$, є дійсним для гармонійного протікання

процесу. Амплітуда коливань, $A_{c,n}$ за даними (табл. 6.5), змінюється в межах 4-20 мкм і у часі процесу за числовим значенням та характером зміни суттєво впливає на величину акустичного тиску (рис. 5.17).

Тиски кавітаційного процесу. Аналітичні залежності для визначення виникаючих тисків процесу протікання технологічного процесу наведені в таблиці 6.10.

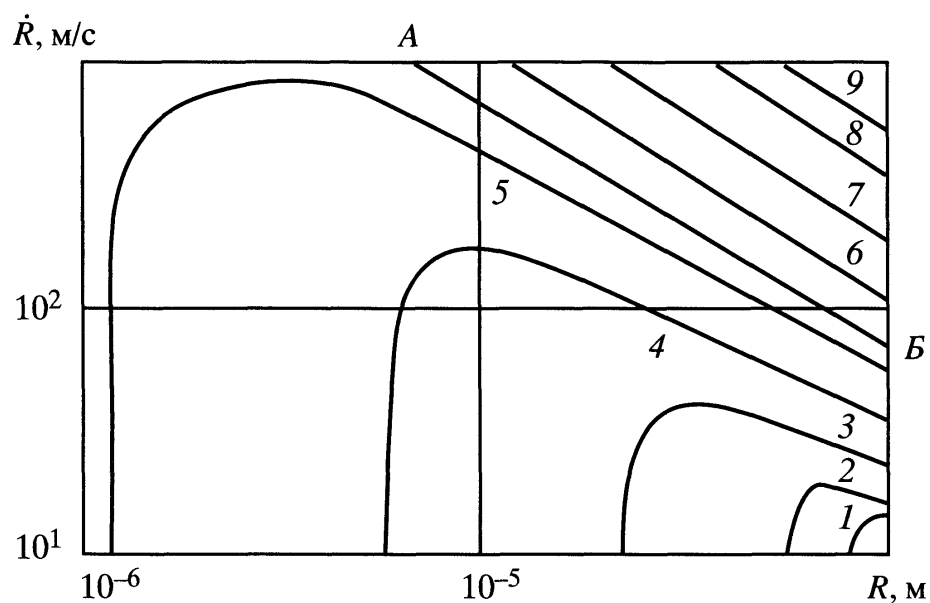
Таблиця 6.10 – Аналітичні залежності для визначення виникаючих тисків процесу протікання технологічного процесу

№ п/п	Назва тиску	Аналітична залежність для визначення тиску
1	Рівнодіючий тиск, p_p	$p_p = \rho \frac{d^2 R}{dt^2}.$
2	Зовнішній тиск, p_z	$p_z = -p \sin \omega t + p_0.$
3	Динамічний тиск, p_d	$p_d = \frac{3}{2} \rho \left(\frac{dR}{dt} \right)^2.$
4	Поверхневий натяг, σ_n	$p_{пн} = 2\sigma / R.$
5	Тиск в середині бульбашки, $p_б$,	$p_б = p_\Gamma + p_\pi - p_{пн}.$
6	Тиск газу, p_Γ	$p_\Gamma = \left(p_0 - p_\pi + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma}.$

Розраховані значення тисків із використанням отриманих значень параметрів, що входять в залежності (таблиця 6.10), які приведені в п. 6.2 та п. 6.3, а також в розділах 3-5, використовуються в алгоритмі (рис. 6.13).

Радіус бульбашки. В розрахунках кавітаційного процесу бульбашки відіграють важливу роль, оскільки саме вони є індикатором і носієм енергетики і якісна та кількісна картина їх сплескування визначає ефективність та продуктивність ультразвукової установки в цілому. Під дією звукової хвилі бульбашки змінюють свій радіус від початкового R_0 (етап зародження), поточного R_{min} (етап становлення та розвитку) до розміру R_{max}

з наступним отриманням розміру бульбашки R_{cn} відбувається її сплескування в фазі стискування ультразвукової хвилі. Радіус R_{cn} є умовним, оскільки при сплескуванні бульбашка частково втрачає сферичність. Така її форма пояснюється декількома чинниками, основним із яких є в'язкість. Результатами аналізу та власних досліджень (розд. 3), (табл. 6.5, табл. 6.6) визначено зв'язок співвідношення радіусів бульбашок із в'язкістю. Разом з тим, варто зазначити, що до сьогоднішнього дня відсутній однозначний погляд на ступінь впливу в'язкості на якісну та кількісну картину зміни бульбашки на тій чи іншій стадії кавітаційного процесу. Важливо знати, які характеристики бульбашки враховувати при розрахунках параметрів акустичного апарату, щоби отримати максимальний ефект від передбачуваного процесу. Корисним з цієї точки зору є графік, приведений в роботі [84].



1-12; 2-15; 3-20; 4-50; 5-80; 6-110; 7-200; 8-500; 9-800

Рисунок 6.14 – Швидкість стискування бульбашки у в'язкій рідині ($\mu=1\text{Па}\cdot\text{с}$) за дії інерційних сил при зміні початкової швидкості, м/с:

Варто звернути увагу на характер зміни швидкості стискування бульбашки. Так, швидкість сплескування бульбашок, параметри яких

знаходяться нижче лінії АБ, тобто при зміні початкової швидкості від 12 до 80 м/с мають значення, які мало відрізняються від звичайних, але потім різко швидкість сплескування бульбашок зменшується. В цитованій роботі це пояснюється заміною впливу інерційних сил на в'язкі сили. Для нас цей висновок є підтвердженням важливості впливу в'язкості і висловленої ідеї в роботі про застосування в'язкості, як ключового параметра класифікації технологічних середовищ, що підлягають акустичної кавітаційної обробки (табл. 3.1 та табл. 3.2). Важливо також відмітити наявність таких бульбашок в кластері, які не сплескуються, зменшуючи таким чином ефективність протікання кавітаційного процесу. Критичний радіус таких бульбашок пропонується визначати за формулою [84]:

$$R_{кр} \approx 4.26 \frac{\mu}{\sqrt{p_{\infty} \rho}}. \quad (6.41)$$

Із формули слідує, що в'язкість впливає на $R_{кр}$, при чому суттєво. В роботі [84] зазначається, що ця формула підтверджена експериментальними даними. Дія в'язких сил вивчалася автором роботи [332]. В цій роботі робиться висновок, що з малими початковими значеннями радіусів бульбашок вплив в'язкості є суттєвим, а для великих початкових значень радіусів бульбашок вплив в'язкості є незначним. В дійсності, зародження тих чи інших значень початкових радіусів бульбашок і визначається саме в'язкістю і саме так необхідно пояснювати цей вплив, а не навпаки, як це приведено в роботі [331]. Дивним є те, що це зазначається і в роботі [84], правда, з посиланням на роботу [331]. Отже, вплив в'язкості є обов'язковою умовою при виконанні розрахунків, що і має місце в даній роботі.

Час сплескування. Формулу Релея для визначення часу сплескування τ прийнято вважати першою [84] в теорії кавітаційних процесів:

$$\tau = 0,98 R_{\max} \sqrt{\frac{2\rho}{3p_0}}. \quad (6.42)$$

Не зупиняючись на допущеннях та передумовах, застосованих Релеєм при виводі формули (6.42), що достатньо повно висвітлено в роботах [62-64] та приведеної вище формули (6.4), можна відмітити наявність трьох параметрів кавітаційного процесу: радіусу бульбашки, щільності та динамічного тиску. Надалі була запропонована формула (6.43), яка враховує тиск p_m та коефіцієнти k та α [333]:

$$\tau = kR_{\max} \sqrt{\frac{\rho}{p_o + \alpha p_m}}. \quad (6.43)$$

Коефіцієнт k враховує вміст газу в бульбашці, а коефіцієнт α враховує величина акустичного тиску в момент сплескування. Сутність застосування наведених формул (6.42) чи (6.43) не дає суттєвої відмінності між собою, оскільки коефіцієнт α в області кавітації має значення близько нуля [84]. Що стосується числового значення коефіцієнта k , то в реальних кавітаційних бульбашках вміст газу є малим (0,02...0,03) і $k \approx 0,93$, що є близьким до формули (6.42). Для відшукування більш вдосконаленої залежності для визначення часу сплескування перш за все варто дослідити енергетику кавітаційного процесу, що і було зроблено в четвертому розділі дисертації. В цілому на основі аналізу робіт цього напрямку та результатів виконаних досліджень пропонується час сплескування τ визначати за співвідношенням:

$$T > \tau \geq 0,5T. \quad (6.44)$$

6.6 Застосування ультразвукових кавітаційних технологій для обробки рідинних дисперсних середовищ

Ультразвукові технології реалізуються у формі просторової дискретності акустичної енергії у формі коротких імпульсів [60]. При цьому більшість в режимі розвиненої кавітації у рідині, що полягає в утворенні значної кількості високоенергетичних центрів у вигляді мікроскопічних бульбашок, рівномірно розподілених у технологічному середовищі.

Дія на фізико-хімічні процеси пов'язана з комплексом явищ (акустичні течії, мікропотоки, акустична кавітація, акустичний флотаційний ефект, пандеромоторні сили, радіаційний тиск), які носять нелінійний характер. Величина дії на технологічне середовище визначається параметрами ультразвуку (частота, амплітуда, інтенсивність і об'ємна щільність енергії введених ультразвукових коливань) [13,14,17,19,20,32].

При цьому, як правило, процеси хімічних виробництв (екстрагування, емульгування, диспергування, полімеризації, знезараження, отримання наноматеріалів) спрямовані на різного виду перетворення нанорозмірних природних структур (мікроорганізмів, нанопор рослинної сировини, молекули води, білки, полісахариди та ін.) [308]. Використання ультразвукових технологій, що реалізуються за рахунок дискретно-імпульсного введення в середовище енергії дозволяють забезпечити високу ефективність технологічних процесів. Оскільки при створенні хіміко-технологічної системи “енергетичне поле – технологічне дисперсне середовище” з множиною елементів, які знаходяться у взаємозв'язку, направлена селективна дія пружних коливань на складові елементи сировини та біологічні об'єкти може мати наступні механізми впливу:

1. Утворення радіального мікропотoku спрямованого вздовж зазору, у випадку сплескування кавітаційних бульбашок в об'ємі, обмеженому стінками капіляру, які розглядають як «тверду» поверхню. Як результат – викидання речовини із капіляру в оточуюче середовище. Швидкість потоку буде визначатися діаметром капіляру, амплітудою звукового тиску та величиною статичного протитиску. Таким чином, у капілярі відбувається перетворення ультразвукових коливань у направлений потік рідини, що сприяє зміні молекулярної дифузії на конвективну.

2. Сплескування кавітаційних бульбашок поблизу поверхні частинки призводить до появи кумулятивних струменів, спрямованих у бік поверхні частинки та ударних хвиль. Внаслідок чого частинка буде знаходитися під дією періодичних ударних навантажень. За умови резонансного коливання

частинки дисперсної фази та середовища значно інтенсифікується процес.

3. Селективне варіювання величиною ударного тиску шляхом зміни розмірів бульбашки та безрозмірної відстані до поверхні впливу.

4. Хімічна активація води в наслідок підвищення активності диполя та порушення просторової структури.

Екстрагування в системі «тверде тіло – рідина». Широкого використання в хімічній промисловості для отримання цільових компонентів з полікомпонентних середовищ набув процес екстрагування [21,215]. Швидкість екстрагування в основному лімітується внутрішньою дифузією компонентів, яка характеризується низькими значеннями коефіцієнтів масопереносу.

Виходячи із загальних положень теорії [21,352], щоб поліпшити процес екстрагування, необхідно збільшити рушійну силу процесу і зменшити дифузійний опір його протікання. Для досягнення першого необхідно застосовувати протитечійний спосіб руху фаз, для другого – збільшувати коефіцієнт дифузії речовини всередині частинок сировини, коефіцієнт масовіддачі і зменшувати розмір частинок. Варто враховувати, що ефективність будь-якого виду екстрагування твердої речовини рідиною значно залежить від розчинності, яку можна змінити, підбираючи відповідний розчинник.

Одним з перспективних методів інтенсифікації екстрагування з твердої фази є проведення процесу в умовах накладання високоенергетичних ультразвукових коливань. При накладанні зовнішнього ультразвукового поля структура рослинної сировини піддається силовій термомеханічній дії, яка відбувається за рахунок сплескування несферичних кавітаційних бульбашок, що призводить до створення локальних високотемпературних зон та формування ударних хвиль та мікроструменів. Особливо інтенсивно така дія буде проявлятися при створенні резонансних систем «механічні хвилі – молекулярні структури». Одним із факторів впливу ультразвукового поля на оброблюване середовище є також хімічна активація води при кавітаційній

обробці [7].

Систему «капілярно-пористе тіло – екстрагент (рідина)» розділено на частини: внутрішню – з максимальною концентрацією розчиненої речовини і зовнішню – зі значно меншими значеннями концентрації. При цьому також виділяється зона зі змінною концентрацією у примежовому шарі.

Модель дифузії в капілярі. Капіляри у частинках твердого тіла представлені тупиковими, у яких буде затримуватися повітря, а також наскрізними, проте вони поводять себе як замкнені при повному зануренні у воду.

Фізична модель масообміну на рівні частинки. На поверхні частинок у місцях мікронерівностей поверхні (виступах та впадинах) локалізовані і стабільно існують у рідині зародки кавітації – парогазові бульбашки. Сплескування кавітаційних бульбашок поблизу поверхні частинки призводить до появи кумулятивних струменів, спрямованих у бік поверхні частинки та ударних хвиль. Внаслідок цього частинка буде знаходитися під дією періодичних ударних навантажень. За умови резонансного коливання частинки дисперсної фази та середовища значно інтенсифікується процес.

Тобто відбувається інтенсивне перемішування рідини навколо частинок матеріалу і, як наслідок, зменшення товщини примежового дифузійного шару та прискорення дифузії розчиненої речовини в екстрагент.

Фізична модель процесу у шарі. Модель характеризується сукупністю процесів у капілярах і на рівні частинок, при якій кавітаційні бульбашки будуть відігравати роль мікротрансформаторів, що перетворюють акумульовану потенціальну енергію системи в кінетичну енергію рідини, що розподілена в просторі та в часі. Енергія виділяється одночасно у великій кількості малих локальних зон, що рівномірно розподіленні в об'ємі.

Таким чином, використання ультразвуку в режимі розвиненої кавітації є унікальним способом дії на речовину з метою інтенсифікації процесу екстрагування цільового компонента, оскільки лише використання зазначеного способу дає можливість створити умови як зовнішньої, так

внутрішньої конвективної дифузії.

Екстрагування в системі «рослинна сировина – розчинник». Анатомічна будова рослинної сировини відрізняється своєю складною будовою та полікомпонентністю. Цільові компоненти можуть бути представлені у вигляді розчинів (у рослинному сокові) та структурних компонентів рослинної стінки. При накладанні зовнішнього ультразвукового поля структура сировини піддається силовій механічній дії, що зокрема спричиняє коливання молекулярних структур, послаблює міцність зв'язку між ними, як наслідок, відбувається порушення структури та руйнування хімічного зв'язку між компонентами системи. Особливо інтенсивно така дія буде проявлятися за створення резонансних систем “механічні хвилі – молекулярні структури”.

Розроблена технологія ультразвукового екстрагування за рахунок фізико-механічної дії визначеної величини сили дозволяє реалізувати розділення компонентів рослинної стінки, як наслідок, компоненти розділяються у результаті порушення між ними хімічного зв'язку. Параметри технологічного процесу для сировини у якій цільові компоненти є структурними елементами рослинної стінки: інтенсивність – 10–12 Вт/см², температура 30–40 °С, тип перетворювача – високоамплітудний. Для дифузії цільових компонентів, які містяться у рослинному у вигляді розчинів – інтенсивність – 5–7 Вт/см², температура 30 °С, тип перетворювача – малоамплітудний.

Ультразвукові кавітаційні апарати представлені резонансними коливальними системами, забезпечують рівномірну обробку всього об'єму рідини в тонкому шарі за рахунок розвиненої кавітації та високого рівня інтенсивності ультразвуку.

Використання розробки забезпечує екологічну чистоту та безпечність процесу при збереженні високого виходу та якості компонентів рекомендовано для використання у промислових умовах на підприємствах хімічної, фармацевтичної та харчової індустрії. Регулювання параметрів ультразвукового поля дозволяє впливати на якісні показники компонентів.

Розділення відбувається при “м’якому” режимі обробки.

Ультразвукова технологія знезараження рідинних середовищ.

У багатьох технологічних процесах та в побуті використовуються рідкі середовища, які при експлуатації можуть піддаватися зараженню шкідливими і небезпечними для здоров'я людини мікроорганізмами.

Знезараження є завершальним і обов'язковим етапом обробки води, який забезпечує її очищення від патогенної мікрофлори [357].

До найбільш сучасних і перспективних способів інактивації мікроорганізмів у воді відноситься кавітаційна обробка, яка відрізняється способом збудження кавітації. Аналіз сучасних досліджень знезараження води за використання гідродинамічної кавітації у роторно-імпульсних апаратах, статичного і динамічного типів, а також їх можливих комбінацій з іншими фізико-хімічними методами інактивації мікрофлори [43, 358 - 362] підтверджує їх відносно низьку ефективність, обумовлену наступними недоліками:

- висока або навпаки недостатня енергетика кавітаційних каверн, присутніх в малій кількості в кавітаційній області, порівняно зі значною кількістю мікроорганізмів, нерівномірно розподілених у технологічному об'ємі;

- значні розміри кавітаційних каверн створюють екрануючий ефект і перешкоджають рівномірному розповсюдженню ударних хвиль, що виникають під час сплескування каверн;

- мала кількість енергетично потужних кумулятивних струменів, що утворюються під час сплескування каверн поблизу поверхонь (поверхня кавітаційної камери, сусідньої каверни або мікроорганізму);

- необхідність створення вартісної гідросистеми для отримання швидкісного потоку рідини.

Використання ультразвукової кавітації, створеної за рахунок дискретно-імпульсного введення в рідину акустичної енергії, дозволяє усунути багато з

зазначених недоліків та забезпечити високу ефективність технологічного процесу знезараження [41].

Високу ефективність знезараження за малих витрат енергії забезпечує просторова дискретність акустичної енергії у формі потужних, але коротких імпульсів. При цьому, значна кількість мікроскопічних кавітаційних бульбашок представляють собою високоенергетичні центри, які рівномірно розподілені в оброблюваному середовищі в безпосередній близькості до мікроорганізмів.

У воді і технологічних рідинах найбільш часто зустрічаються декілька груп мікроорганізмів, які здатні викликати у кінцевого споживача різного роду захворювання: бактерії, віруси, гриби і «прості». Для більшості прокаріотів клітинна будова подібна і являє собою набір основних компонентів, таких як клітинна стінка, цитоплазматична мембрана, цитоплазма з включеннями і нуклеотиди. В будові клітини можуть бути присутніми додаткові структури, такі як капсули, джгутики і т.д. Відмінності між групами мікроорганізмів, насамперед, полягають в геометричних розмірах, формі і структурі.

Цілком очевидно, що для досягнення високої ефективності технологічного процесу знезаражування рідких середовищ за допомогою ультразвукової кавітації необхідно враховувати розмір і структуру мікроорганізмів. Кавітаційну обробку дослідних проб води проводили в експериментальних установках за допомогою високоамплітудного кавітатора та ультразвукового трубчастого кавітатора .

На першій стадії досліджень вивчали вплив ультразвукової кавітації на найпростіших (табл. 6.11).

Результати знезараження технологічних стоків тваринницького комплексу при застосуванні ультразвукової кавітації представлені в таблиці 6.11.

Аналіз даних свідчить про залежність інтенсивності руйнування клітин найпростіших від часу ультразвукової обробки, тривалість обробки менше хвилини. Таким чином, за малої продуктивності доцільно використання

ультразвукового високоамплітудного кавітатора з акустичним трансформатором коливальної швидкості, який здатний вводити в рідину ультразвукові коливання з інтенсивністю до 20 Вт/см^2 на резонансній частоті 22 кГц.

Таблиця 6.11 – Результати експериментальних досліджень

№ проби	Параметри обробки	Результати	Розмір
1	Без обробки	Яйця аскариди – 5 шт. в 5-ти полях зору	40...50 мкм
2	Без обробки	Амеба – 2-3 в полі зору	20...30 мкм
3	Без обробки	Яйця аскариди – 1 шт. в 5-ти полях зору	40...50 мкм
1	УЗО обробки (УЗО) – 6 с	Амеба – 1 в полі зору	20...30 мкм
1	УЗО – 12 с	Яйця аскариди – 5 шт. в 5-ти полях зору	40...50 мкм
1	УЗО – 30 с	Не виявлено	-
2	УЗО – 30 с	Не виявлено	-
3	УЗО – 30 с	Не виявлено	-

* 1 пробу отримано перед першим ступенем очищення; 2 пробу отримано перед другим ступенем очищення; 3 пробу отримано на виході після очисних споруд.

Ефективні схеми обробки води високої продуктивності в потоці передбачають максимально можливе скорочення тривалості обробки, що можливо реалізувати шляхом підвищення рівня інтенсивності, введеної в рідину, ультразвукової хвилі. Проте, введення у рідину ультразвукових коливань з інтенсивністю понад $18...20 \text{ Вт/см}^2$ за використання описаного кавітатора не доцільно, так як на випромінюючій поверхні ультразвукового трансформатора швидкості утворюється двофазний кавітаційний прошарок,

що розсіює та поглинає ультразвукову енергію, перешкоджаючи її проходженню в об'єм технологічного середовища.

Для вирішення проблеми запропоновано вводити в рідину ультразвукові коливання малої інтенсивності, забезпечуючи при цьому малі втрати, а підвищення інтенсивності коливань в технологічному середовищі до необхідного високого рівня забезпечувати за рахунок фокусуючих властивостей поверхні, що випромінює. Це може бути досягнуто, наприклад, за допомогою застосування в кавітаторі трубчастого вібратора, на зовнішній твірній поверхні якого встановлені п'єзоелектричні резонансні приводи поздовжніх переміщень з ножевидними трансформаторами коливальної швидкості [59,232].

Виявлено картину розподілу звукового тиску по перерізу трубчастого вібратора, зокрема, для радіальної моди коливань. Встановлено фокусування, тобто концентрацію ультразвукової енергії вздовж осі вібратора та її мінімальний рівень на внутрішній поверхні кавітатора, що підтверджує коректний вибір параметрів і режимів кавітаційної обробки води з метою інактивації мікроорганізмів.

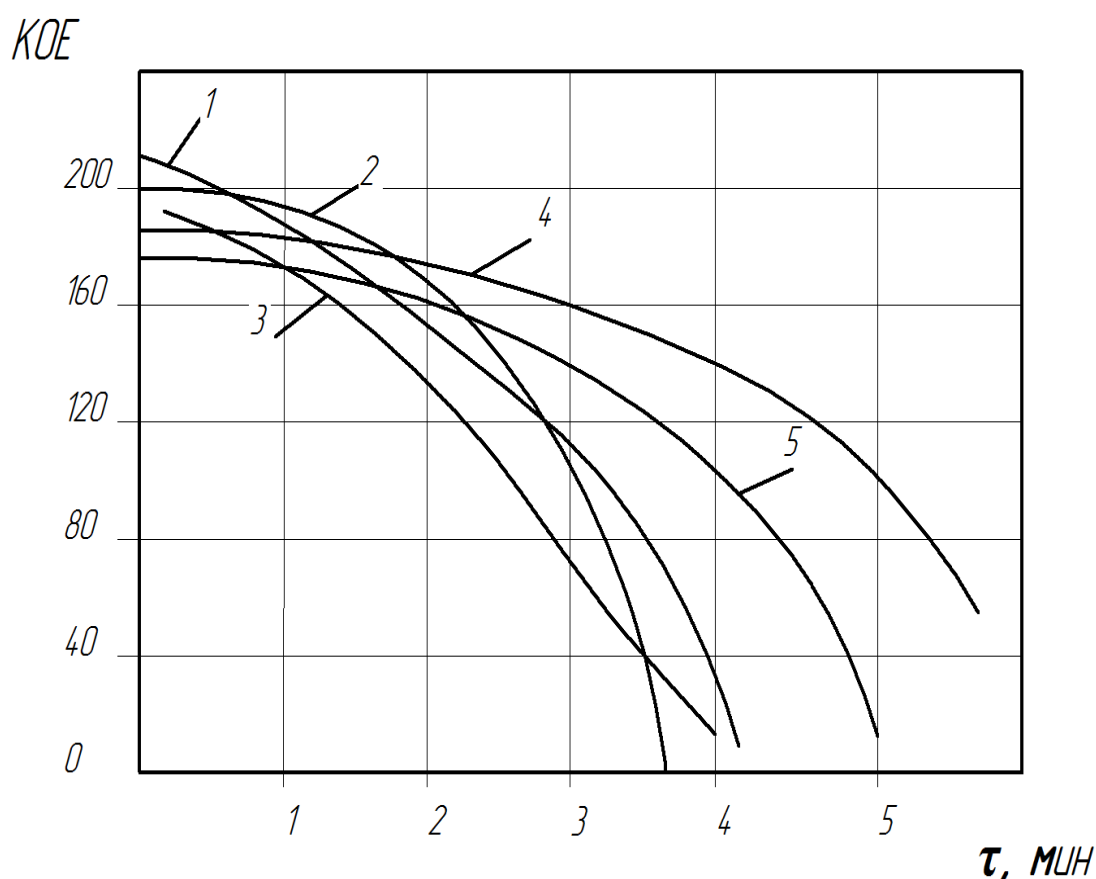
Установка з трубчастим вібратором, які генеруються на радіальній моді коливань, дозволяє значно підвищити інтенсивність ультразвукової обробки. Резонансна частота вібратора становила 25 кГц, споживана потужність змінювалася в діапазоні 100...600 Вт, інтенсивність ультразвуку уздовж осі вібратора – до 100...140 Вт/см², об'єм кавітаційної камери – 260 мл. Коригування і зміна параметрів установки здійснювалося системою цифрового управління.

Для визначення ефективності трубчастого кавітатора були проведені дослідження інактивації мікроорганізмів. Як і в попередньому випадку, починали з впливу на представників «найпростіших».

Аналіз отриманих даних підтверджує, що при введенні в рідину ультразвукових коливань з більшою інтенсивністю потрібно менше часу для досягнення необхідного рівня інактивації мікроорганізмів.

Необхідно відмітити, що для інактивації бактерій, на відміну від найпростіших, необхідний більш високий рівень інтенсивності ультразвукових коливань.

З метою з'ясування впливу ультразвукової обробки різної інтенсивності на ступінь руйнування мікроорганізмів була проведена серія досліджень. Отримані експериментальні дані показують, що знезараження різних штамів мікроорганізмів доцільно проводити за підведеної потужності 500 Вт (рис. 6.15).



- 1 – *Escherichia coli*; 2 – *Bacillus Stearothermophilus*, вегетативна форма;
 3 – *Pseudomonas aeruginosa*; 4 – *Bacillus Stearothermophilus*, спорова форма;
 5 – *Staphylococcus aureus*

Рисунок 6.28 – Залежність інактивації музейних штамів мікроорганізмів від часу обробки при підведеної потужності 500 Вт

Подальше підвищення інтенсивності ультразвуку не призводить до значного зниження часу обробки, тобто є енерговитратним.

В роботах [269,363,364] механізми бактерицидної дії ультразвуку пов'язують з ударними хвилями, градієнтами тиску, локальним підвищенням температури, хімічними реакціями і т. д.

Таким чином, основним механізмом інактивації за використання ультразвукової кавітації високої інтенсивності на мікроорганізми, що представляють собою в основному рідкі дисперсні системи, полягає в тому, що утворюються малорозмірні бульбашки, здатні розташовуватися в безпосередній близькості від мікроорганізмів, що призводить при сплескуванні бульбашок до утворення енергетично потужних кумулятивних мікроструменів, спрямованих у бік поверхні мікроорганізмів [326,338]. Кумулятивні струмені надають руйнівну дію на клітинну стінку та клітку в цілому. Велика кількість малорозмірних кавітаційних бульбашок за ультразвукової кавітації сприяє рівномірному насиченню ними оброблюваного об'єму рідини, забезпечуючи високу ефективність і продуктивність процесу знезараження. Інші, супутні явища ультразвукової кавітації, ефекти – ударні сферичні хвилі, високі локальні температури і тиски, окислювальні процеси також беруть участь в процесі інактивації мікроорганізмів, але їх вплив менш помітно.

Отже, підвищення продуктивності процесу ультразвукового знезараження рідких середовищ, а також розширення спектру мікроорганізмів досягається шляхом підвищення інтенсивності ультразвукових коливань у технологічному об'ємі оброблюваної рідини.

Необхідний високий рівень інтенсивності ультразвукових коливань рідини доцільно досягати, використовуючи фокусуючі властивості випромінюючої поверхні кавітатора.

Отримання високоякісного молока-сировини. У молочній промисловості України якість молока-сировини є найбільш ваговою проблемою[343,344,347,350]. Відповідно до нового стандарту ДСТУ

3662:2018 «Молоко-сировина коров'яче. Технічні умови» передбачено підвищенні вимоги до органолептичних, фізико-хімічних та гігієнічних показників щодо оцінювання якості закупівельного молока, для впровадження систем аналізування небезпечних чинників та контролювання в критичних точках [349]. У Європейській спільноті регулюючим документом є Регламент ЄС № 853/2004 Європейського Парламенту та Ради від 29 квітня 2004 р. секція XI «Сире молоко та молокопродукти», яким встановлено вимоги щодо гігієни молока-сировини (табл. 6.11), [342].

Методикою було передбачено підвищення якості молока-сировини в умовах сільськогосподарських підприємств, яка складалася із вирішення наступних питань:

- обґрунтування доцільності поліпшення мікробіологічних показників молока під час його первинної обробки;
- розробка схеми знезараження молока за використання ультразвукових кавітаційних технологій.

Якість молока неможливо поліпшити в процесі переробки. У кращому випадку воно може бути стабілізовано (призупинено або загальмовано його погіршення), тому система управління якістю молока-сировини повинна акцентувати увагу на технологічних процесах його виробництва та первинної обробки з використанням превентивного підходу. Сутність превентивного підходу ґрунтується на своєчасній ідентифікації негативних елементів (джерел забруднення) та передбачає розробку комплексу техніко-технологічних заходів, спрямованих на запобігання небезпечних явищ (підвищення бактеріального забруднення).

Загальне бактеріальне обсіменіння молока-сировини БО (тис. КУО/см³) доцільно розглядати як сукупність наступних джерел потрапляння мікроорганізмів до технологічного середовища: мікрофлора поверхні вимені та дійок (K_1), мікрофлора каналів вимені (K_2); мікроорганізми доїльного обладнання, молокопроводів, молочної тари (K_3); мікрофлора персоналу та довкілля (K_4).

Функціональна залежність загального бактеріального обсіменіння молока-сировини має наступний вигляд:

$$BO = \sum_{i=1}^n K_i \quad (6.45)$$

Значення загального бактеріального обсіменіння молока-сировини БО (тис. КУО/см³) порівнюють з показниками якості та відповідно до стандарту ДСТУ 3662:2018 «Молоко-сировина коров'яче» разом з іншими показниками якості встановлюють ґатунок.

Таким чином, група чинників, що об'єднуються поняттям “технологія та культура виробництва” та безпосередньо або опосередковано впливають на кількість мезофільних аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів молоці-сировині визначають загальне бактеріальне обсіменіння.

Наступним етапом є первинна обробка молока. Під поняттям первинна обробка молока розуміють комплекс операцій, яким піддають свіжовидоєне молоко з метою збереження його якості та запобігання псування. Для молочних ферм і комплексів виконання операцій первинної обробці молока безпосередньо після доїння є безумовно необхідною.

З метою підвищення якості та безпечності молока-сировини доцільно під час первинної обробки використовувати операцію знезараження.

Технологічний процес первинної обробки молока відбувається у такій послідовності. Видоєне молоко, що надходить у молокозбірник, спрямовується на очищення (сепаратор-молокоочисник), потім до ультразвукової кавітаційної установки та на охолодження.

Використання ультразвукових кавітаційних технологій для знезараження молока дозволяє вирішити ціле коло проблем, зокрема підвищення сортності молока та отримати більше коштів для господарства, якісна сировина для молокопереробних підприємств.

Запропоноване рішення підвищення якості та безпечності молока-сировини вирішено шляхом додаткового використання процесу знезараження. Використання ультразвукових кавітаційних технологій для знезараження

молока дозволило підвищити гатунок молока та отримати більше коштів для господарства, забезпечити якісною сировиною молокопереробні підприємства.

Підвищення інтенсивності процесів інактивації мікрофлори. Підвищення ефективності ультразвукового кавітаційного знезараження рідинних дисперсних середовищ шляхом підвищення руйнівного механічного впливу на поверхневі структури, що обмежують цитоплазму мікрофлори та клітину в цілому; зниження енерговитрат та збереження нативних показників можливо шляхом внесення абразивного матеріалу, який після завершення обробки видаляють з рідини, наприклад фільтруванням.

У випадку неможливості використання стороннього абразивного матеріалу та значного ускладнення його подальшого видалення підвищення ефективності ультразвукового кавітаційного знезараження рідинних технологічних середовищ досягнуто шляхом додавання дрібнодисперсного абразивного швидкорозчинного матеріалу дозволеного, згідно технологічного регламенту виробництва.

Дезінтеграція клітин мікроорганізмів полягає у невідновному руйнуванні поверхневих структур, що обмежують цитоплазму. Забезпечити реалізацію процесу знезараження в полі дії ультразвукових коливань можливо шляхом забезпечення необхідного рівня енергії та впливу механічного подразнення клітин.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що застосування суто кавітаційного знезараження середовища час обробки близько 7 хвилин. Використання запропонованого способу при додаванні кристалічного матеріалу в кількості 5–10% час необхідний інактивації мікрофлори близько 4 хвилин. Після обробки отримують оброблене середовище з відповідною концентрацією розчиненої речовини.

Регенерація мастильно-охолоджуючих рідин. Проведені дослідження регенерації мастильно-охолоджуючих рідин, які використовуються при операціях металообробки валів, корпусних деталей, зубчатих вінців

автомобільних кранів. Спосіб регенерації мастильно-охолоджуючих рідин реалізовано шляхом ультразвукової кавітаційної обробки жирової емульсії (Акт впровадження на ПАТ «Дрогобицький завод автомобільних кранів»). Режимми роботи ультразвукового технологічного обладнання: робоча частота механічних коливань 22 кГц та потужність 400 Вт. Результати досліджень дозволили забезпечити стійкість жирової емульсії, покращити реологічні та технологічні властивості мастильно-охолоджуючих рідин.

Активация мікрофлори. Ферментативні процеси в переробних виробництвах реалізують шляхом використання мікрофлори, як правило, забезпечення необхідної якості продукції реалізують її полікомпонентним складом. Ультразвукові коливання можна вважати своєрідним фізичним каталізатором біофізичних, біохімічних і фізико-хімічних процесів і реакцій в біологічному об'єкті.

Головне значення в механізмі дії ультразвуку на біологічні об'єкти: механічний (мікромасаж на клітинному і субклітинному рівнях, як наслідок підвищення проникності мембран клітин, за рахунок чого полегшується процес транспорту речовин через мембрану, а отже і посилення проникнення речовин в клітину), тепловий (збільшення швидкості протікання обмінних процесів та виникнення температурних градієнтів) і фізико-хімічний (знакозмінні пружні коливання викликають у клітинах механічний резонанс) фактори.

Дія всіх трьох факторів (теплого, механічного та фізико-хімічного) тісно пов'язана між собою і надає клітині комбінований вплив. Отже, ультразвук можна розглядати як фізичний каталізатор фізико-хімічних і біофізичних процесів в клітинах мікрофлори.

Відповідно до досліджень ефективність технології може бути реалізовано двома шляхами:

1. зменшення кількості закваски (в 2–3 рази) за регламентованих параметрів технологічного процесу виробництва;
2. внесення регламентованої кількості закваски за зниження тривалості

технологічного процесу в 2–3 рази.

Вибір має ґрунтуватися на розрахунках економічній ефективності та виробничих особливостях. При цьому доведено високу ефективність використання ультразвукових коливань.

Отриманні результати промислового випробування, у порівнянні з існуючими технологією та обладнанням, підтверджують достатньо високу ефективність (Акт впровадження на ТОВ «Люстдорф» та ПП «Кондитерський дім «Санкруа»). Ефективність виробництва кисломолочних напоїв за ультразвукової дії можливо реалізувати одним зі способів, зокрема шляхом використання закваски в кількості 3% та зниження тривалості ферментації до 3 год. за температури 35°C; або тривалість обробки 6 год. за температури 35°C зі зменшенням вмісту закваски до 1%. Було реалізовано процес активації дріжджів за рахунок підвищення фізіологічної активності дріжджових клітин; підвищується мальтозна активність та покращується підйомна сила. Отримані хлібобулочні вироби відповідають високим стандартам якості.

6.7 Висновки по розділу

1. Для формулювання основних положень створення синергетичних систем «ультразвукова установка – технологічне середовище» прийнята умова, що важливим фактором підвищення ефективності акустичних апаратів є створення умов для їх можливої здатності ціле направлено спрямовувати енергію на протікання кавітаційного процесу обробки технологічного середовища. При цьому враховується встановлене положення, що швидкість протікання кавітаційного процесу обробки технологічного середовища визначається не енергією первинної акустичної хвилі, а енергією, що спонукає сплескування кавітаційних бульбашок.

2. Для реалізації критеріальної оцінки обґрунтування раціонального вибору структурно-параметричної системи «акустичний апарат – технологічне середовище» запропоновано алгоритм (рис. 6.1). Сутність

алгоритму полягає у можливості варіювати не тільки вихідними параметрами та схемою розташування кавітатора відносно оброблювального середовища, а і визначити вплив змінних параметрів на максимальне значення того чи іншого критерія (табл. 6.2). Важливим етапом алгоритму є блоки 3 і 5, які визначають фізичну та математичну моделі на основі, виконаних і приведених вище (розділи 3 - 5), результатів дослідження. Саме в блоках 4, 6, 7 формуються вихідні дані для визначення числових значень параметрів впливу та границі раціонального їх використання. Завершенням розрахунку є параметри, що слугують вихідною інформацією для остаточного прийняття рішень вдосконалення раціональних конструктивних та технологічних параметрів акустичного кавітатора.

3. Визначена необхідна ступінь впливу і врахування стадій, раціональних режимів та параметрів для розробки методик, що реалізують підвищення ефективності протікання кавітаційного процесу за умов мінімізації енергетичних витрат: основні умови виникнення порогу кавітації (табл. 6.3); граничні значення інтенсивності для середовища різної в'язкості (табл. 6.4); залежність між амплітудою коливань, в'язкістю та максимальним радіусом бульбашки (табл. 6.5); залежність максимального радіуса кавітаційних бульбашок від величини звукового тиску (табл. 6.6); розрахункові значення амплітуд переміщення, швидкості, прискорення та тиску (табл. 6.8); числові значення відношення амплітуд коливань бульбашки в залежності від коефіцієнта демпфірування для різних відношень частот коливань (табл. 6.9); аналітичні залежності для визначення виникаючих тисків процесу протікання технологічного процесу (табл. 6.10). Для здійснення розрахунків параметрів ультразвукової кавітаційної системи «кавітатор – технологічне середовище» було розроблено ряд алгоритмів (рис. 6.11 – 6.13).

4. Здійснена практична реалізація ефективності результатів досліджень на прикладі розроблених методів та способів: процесу екстрагування, технології знезараження дисперсних середовищ, регенерації мастильно-охолоджуючих рідин, активації мікрофлори.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить нове розв'язання актуальної наукової проблеми, яка полягає у розробці технології й обладнання ультразвукової обробки рідинних дисперсних середовищ на основі синтезу досліджених умов взаємодії акустичного апарата і середовища та цілеспрямованої реалізації запропонованих режимів і параметрів робочого процесу. Результати, отримані у процесі дослідження, дають підстави сформулювати такі висновки та пропозиції.

1. Здійсненим аналізом сучасних методів та обладнання ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ і матеріалів визначено, що сучасний стан теорії не розкриває повної картини процесу кавітаційної обробки, унаслідок чого стримується його розвиток, залишається невирішеною проблема вдосконалення режимів і параметрів.

2. Визначення методик досліджень обґрунтовано на основі прийняття технологічного середовища як дисперсного, а в аналітичних моделях, як систем з розподіленими параметрами, враховуються: режим навантаження та умови впливу на випромінювач, фізичні характеристики і реологічні властивості.

3. Розроблений алгоритм досліджень передбачає поетапне визначення і врахування у часі послідовності стадій утворення, розвитку та сплескування бульбашок кавітаційної області, що надало змогу наблизити реальну картину процесу до змодельованої розрахункової схеми досліджень.

4. Встановлено закономірності руху системи «кавітаційний апарат – середовище», їх взаємодію на основі врахування дискретних та розподілених параметрів. Зведення до дискретної форми математичних залежностей уможливило отримання формули для цілеспрямованого узгодження режимів і параметрів кавітаційного апарата і технологічного середовища. Встановлення компенсатора між випромінювальною поверхнею апарату і оброблювальним

середовищем забезпечено максимальну передачу енергії та збільшення об'єму зони розвиненої кавітації на 35–45 %.

5. Визначено критерії та параметри, використання яких пропонується як оцінювання в алгоритмах та методиках розрахунків раціональних режимів і параметрів залежно від вихідних даних кавітатора та середовища.

6. Встановлено нові числові значення інтенсивності в межах 5,0...20,0 Вт/см² для утворення раціонального об'єму кавітаційної зони. Визначені основні умови виникнення першого та другого порогів кавітації від зміни швидкості коливань, v . Для $v=0,1$ м/с – перший, а при $v>5,0$ м/с настає другий поріг.

7. Запропоновано як основний параметр класифікації прийняти в'язкість, тому що ефективність обробки рідинних технологічних середовищ зумовлена відповідними рівнями граничних значень інтенсивності. Якщо при коефіцієнті в'язкості рідини, близькому до в'язкості води ($\mu=10^{-3}$ Па·с), вплив в'язкості на сплескування кавітаційних бульбашок є незначним, то при коефіцієнті в'язкості 10^{-2} – 10^{-1} Па·с дія в'язких сил вже починає позначатися на поведінці кавітаційних бульбашок. Вплив в'язкості найбільш сильно проявляється при малих амплітудах акустичного тиску і, першою чергою, позначається на бульбашках з невеликими радіусами.

8. Для утворення області (кластеру) бульбашок, що сплескуються, синтезовано в єдину систему параметри: амплітуда коливань – у межах 4.0...20,0 мкм, величина звукового тиску – у межах 5,0...30,0 10^5 Па, відповідне значення в'язкості – у межах 1,0...50,0 10^{-3} Па·с та максимальний радіус бульбашки – у межах 35,0...60,0 мкм.

9. Здійснено дослідження енергії обробки технологічного середовища за умови гармонійної та імпульсної дії акустичного апарата. Отримано аналітичні залежності енергетичних критеріїв для оцінки процесів кавітаційної обробки технологічних середовищ.

10. Досліджено та послідовно викладено методики визначення резонансної частоти бульбашки, а потім і всієї області у вигляді певного

кластеру. Згідно з розрахунками за формулами для визначення резонансного режиму отримано коефіцієнт підсилення амплітуди коливань у 7–8 разів, що не лише сприяє зменшенню енергії на 50–70 %, а й гарантує стійкий режим роботи акустичного апарату.

11. Проведені дослідження підтвердили достатню достовірність прийнятих фізичних і математичних моделей. Щодо розбіжностей між значеннями таких параметрів коливань, як звуковий тиск, амплітуди коливань, інтенсивність, отриманих різними методами, становить 12–15%. Менша розбіжність відноситься до звукового тиску та середовищ з меншою в'язкістю, тому що параметри в резонансному режимі суттєво залежать від точності врахування дисипативних властивостей, які визначаються в'язкістю.

12. Здійснено практичну реалізацію ефективності результатів досліджень на прикладі виявлених нових фізичних явищ робочих процесів акустичної обробки рідинних середовищ, розроблених теоретичних основ теорії руху складних динамічних систем, алгоритмів методів та способів. Наведено дані про впровадження отриманих результатів досліджень у навчальний процес та на підприємствах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скоромна О. І., Разанова О. П., Поліщук Т. В., Шевчук Т. В., Берник І.М., Паладійчук О. Р. Науково обґрунтовані заходи підвищення молочної продуктивності корів та покращання якості сировини в умовах виробництва. Монографія. Вінниця: ВНАУ, 2020. 174 с.
2. Луговський О.Ф., Берник І.М. Ультразвукові кавітаційні апарати для реалізації екологічно безпечної технології вилучення пектину із вторинної рослинної сировини. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія машинобудування. 2010, № 58. С. 82–86.
3. Луговський О.Ф., Берник І.М. Фізична модель ультразвукового кавітаційного вилучення пектину із вторинної рослинної сировини. *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»* серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2010, №1 (5). С. 25–30.
4. Луговський О.Ф., Берник І.М. Ультразвуковий кавітаційний екстрактор для рідинно-дисперсних середовищ. *Наукові праці ОНАХТ. Серія «Технічні науки»*. 2010, №37. С. 348–352.
5. Берник І.М., Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В. Дослідження звукового поля та технологічних можливостей малоамплітудного резонансного кавітатора при обробці рідинно-дисперсних середовищ. *Промислова гідравліка і пневмоавтоматика*. 2011, № 1 (31). С. 44–47.
6. Берник І.М., Луговський О.Ф., Лобань Ю.М. Модель управління технологічним процесом ультразвукового кавітаційного вилучення пектину з рослинної сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011, №1 (61). С. 133–137.
7. Берник І.М., Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В. Ультразвукова кавітаційна технологія для екстрагування рослинного матеріалу та обладнання для її реалізації. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011, №3 (63). С. 86–91.

8. Луговський О.Ф., Берник І.М. Виробництво пектинового концентрату з використанням ультразвукових кавітаційних технологій. Збірник наукових праць *Вінницького національного аграрного університету. Серія «Технічні науки»*. 2011, Вип. 9. С. 159–163.
9. Луговський О.Ф., Берник І.М. Теоретичне обґрунтування доцільності використання ультразвукових кавітаційних технологій у технологічних процесах. *Техніка будівництва*. 2011, №26. С. 52–59.
10. Берник І.М. Основні засади проектування машин і обладнання переробних виробництв. *Теорія і практика будівництва*. 2011, №8. С. 6–9.
11. Луговская Е.А., Яхно О.М., Берник И.Н. Модель управления технологическим процессом ультразвуковой очистки эластических поверхностей. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Гірничо-електромеханічна*. 2012, Вип.23 (196). С. 154–166.
12. Берник І.М. Інтенсифікація технологічних процесів обробки харчових середовищ. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013, №3 (71). С. 109 –115.
13. Берник І.М. Аналіз параметрів впливу на формування моделі акустичної обробки рідинних харчових середовищ. *Наукові праці ОНАХТ. Серія «Технічні науки»*. 2014, Вип. 45 (2). С. 129–133.
14. Луговський О.Ф., Берник І.М. Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2014, №3 (75). С. 121–126.
15. Берник І.М. Дослідження параметрів кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ. *Техніка будівництва*. 2014, №32. С. 14 – 18.
16. Берник І.М. Енергетика кавітаційної обробки технологічного середовища. *Наукові праці ОНАХТ*. 2015, Том 1 (47). С. 87–90.

17. Bernyk I., Luhovskyi O., Nazarenko I. Research staff process of interaction and technological environment in developed cavitation. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*. 2016, Вип. №1 (76). С. 12–19.
18. Bernyk I. Research parameters of ultrasound processing equipment dispersed in a technological environment. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016, Vol. 18. №3. p. 3–13.
19. Луговський О. Ф., Берник І. М. Аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітаційній області ультразвукового поля. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2016, №18. С. 10–15.
20. Bernyk I. Theoretical aspects of the formation and development of cavitation processes in technological environment. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2017, Vol.19. № 3. P. 5–13.
21. Берник І.М. Інтенсифікація процесу екстрагування рослинної сировини з використанням ультразвукової кавітації. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017, № 3(98). 69–73.
22. Bernyk I., Luhovskyi O. Research and calculation of rational modes and parameters of an ultrasonic cavitator. *IX International Conference “Heavy Machinery-НМ 2017”*. Zlatibor, 28 June. 1 July 2017, A. 109 – 112.
23. Берник І.М. Дослідження в'язкості дисперсних середовищ в умовах їхньої інтенсивної обробки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018, №1 (100). С. 62–67.
24. Bernyk I. Investigation of the processes of the acoustic apparatus with the processing technological environment power interaction. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018, Том 1. № 82. С. 72–80.
25. Luhovskyi O.F., Gryshko I.A., Bernyk I.M. Enhancing the Efficiency of Ultrasonic Wastewater Disinfection Technology. *Journal of Water Chemistry and Technology*. March 2018, Vol. 40. Is.2. P. 95–101.

26. Bernyk I., Nazarenko I., Luhovskyi O. Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation. *Materials and technology*. 2018, № 4 (52). P. 465–468.
27. Bernyk I., Nazarenko I., Luhovskyi O., Svidersky A. Researcher of the influence of low-frequency and high-frequency actions on processing of technological environments. *Eureka: Physics and Engineering*. 2018, №1. P. 73–86.
28. Берник І.М., Кутняк М.М., Коц І.В. Віброекстрактори з гідроімпульсним приводом для застосування в робочих процесах систем «тверде тіло – рідина». *Продовольчі ресурси: зб. наук. пр.* 2019, №12 С. 16 – 24.
29. Берник І.М., Коц І.В. Вибір алгоритму управління процесом барометричної обробки харчової сировини в тепловій камері з аеродинамічним нагріванням. *Продовольчі ресурси*. 2019, №13. С. 7–14.
30. Bernyk I. Research and Determination of Effective Parameters for Acoustic Technological Environment. *Тека*. 2019, Vol.19. №1. P. 65 – 77.
31. Bernyk I., Luhovskyi O., Wojcik W., Shedreyeva I., Karnakova G. Theoretical Investigations of the Interaction of Acoustic Apparatus with Technological Environment Working Process. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019, №1(4). P. 32–37.
32. Берник І.М. Інноваційний підхід до одержання високоякісного молока-сировини. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2019, №3(106). С. 46–55.
33. Bernyk I. Estimation of efficiency of ultrasonic cavitation processing of technological media on energy criteria. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020, №2 (89). С. 18–28.
34. Берник І.М., Коц І.В., Бауман К.В. Гідродинамічна установка для приготування жирових емульсій. *Продовольчі ресурси. Збірник наукових праць*. 2020, № 14. С. 29–34.
35. Luhovskyi O., Bernyk I., Gryshko I., Abdulina D., Zilinskyi A. Mobile Equipment for Ultrasonic Cavitation Inactivation of Microorganisms in the Liquid Environment. In: Stryczek J., Warzyńska U. (eds) *Advances in Hydraulic and*

Pneumatic Drives and Control 2020, P. 272-281. NSHP 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8_24.

36. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Determination of stability of models and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, Vol. 6. №7 (108). P. 71–79.

37. Луговський О. Ф., Зілінський А. І., Шульга А. В., Лавріненко А.Д., Гришко І. А., Берник І. М. Експериментальне дослідження стійкості конструкційних матеріалів до кавітаційної ерозії. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020, №3 (90). С. 29–33.

38. Патент на корисну модель № 201809320. Спосіб підготовки води в басейнах для плавання із застосуванням ультразвуку. Луговський О. Ф., Берник І.М., Гришко І. А., Зілінський А. І., Луговська К. О., Храменков О. В. заявл. 12.09.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.

39. Патент на корисну модель №137288. Спосіб ультразвукової кавітаційної інактивації мікрофлори рідинних технологічних середовищ. Берник І.М. заявл. 72.04.2019; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19.

40. Патент на корисну модель № 144597. Мобільний ультразвуковий пристрій для обробки рідини. Луговський О. Ф., Берник І.М., Мовчанюк А.В., Гришко І. А., Луговська К.О., Зілінський А.І., Шульга А.В. заявл. 18.05.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 19.

41. Луговський О.Ф., Берник І.М. Перспективи використання енергоощадних методів обробки харчових середовищ. Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Черкаси, 17–20 квітня 2012. С. 49.

42. Луговський О.Ф., Берник І.М. Підвищення якості молочної продукції за рахунок застосування явища ультразвукової кавітації. Тези доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка та технологія». Севастополь, 11–15 червня 2012. С. 44.

43. Берник І.М., Луговський О.Ф. Моделювання характеристик харчового середовища в акустичному полі навантаження. Матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Кіровоград, 21–24 травня 2014 р. С. 59–60.

44. Луговской А.Ф., Мовчанюк А.В., Берник И.Н., Гришко И.А. Ультразвуковые кавитационные стерилизаторы жидких сред. Матеріали першої науково-практичної конференції біомедичних інженерів і технологів України «Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії і медичної промисловості України». Київ, 7–8 жовтня 2015 р. С. 31.

45. Берник І.М., Луговський О.Ф. Енергетика кавітаційної області. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ НТУУ «КПІ». 25–29 травня 2015 р. С. 50.

46. Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Берник І.М. Ультразвукова кавітація в сучасних технологіях. Матеріали МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 21 – 24 червня 2016 р. м. Одеса – м. Київ. С. 132.

47. Луговской А.Ф., Мовчанюк А.В., Берник И.Н., Гришко И.А. Повышение эффективности технологических процессов с помощью ультразвуковой кавитации. Тези доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідравліка і пневматика». Харків, 19 – 21 жовтня 2016. С. 33–34.

48. Берник І.М., Луговський О.Ф. Фізичні аспекти послідовності досліджень кавітаційного процесу. Матеріали XXII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Черкаси. 23–26 травня 2017 р. С. 32 – 33.

49. Берник І.М., Луговський О.Ф. Синергетика стадій кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ. Тези доповідей XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідравліка і пневматика». Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 23–24.

50. Берник І.М., Луговський О.Ф. Ексергія ультразвукової обробки технологічних середовищ. Тези доповідей Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України». Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 131.

51. Берник І. М. Дослідження робочого процесу взаємодії акустичного апарату із технологічним середовищем. «Вібрації в техніці та технологіях» XVI Міжнародна науково-технічна конференція 26–27 жовтня 2017 р.: збірник тез доповідей. Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 47 – 48.

52. Луговський О.Ф., Берник І.М. Аспекти ультразвукових технологій в харчовій промисловості. Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційний розвиток харчової індустрії». Київ: ІПР, 2017. С. 135-136.

53. Берник І.М. Теоретичні аспекти моделювання та визначення режимів і параметрів акустичної обробки технологічних середовищ. Матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ НТУУ «КПІ». 19–22 червня 2018 р. С. 96 – 98.

54. Берник І.М. Встановлення раціонального рівня енергії та оптимальних параметрів ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ. Збірник тез доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції “Вібрації в техніці та технологіях” НУ «Львівська політехніка». Львів, 2018 р. С. 47–48.

55. Берник І.М. Врахування зміни властивостей технологічного середовища в процесі ультразвукової обробки на встановлення ефективних параметрів. Збірник тез доповідей I-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту». Вінниця ВНТУ, 13-15 травня 2019 року. С. 231–232.

56. Берник І.М. Дослідження коефіцієнта згасання ультразвуку в кавітуючому рідинному середовищі. Матеріали XXIV Міжнародної науково-

технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ НТУУ«КПІ», 27–30 травня 2019 р. С. 89 – 90.

57. Берник І.М. Визначення та дослідження енергії ультразвукових коливань за гармонійним та імпульсним законами навантаження на технологічне середовище Матеріали XVIII Міжнародної науково-технічної конференції Вібрації в техніці та технологіях, 23-25 жовтня 2019 р. К.: КНУБА, 2019. С. 129–132.

58. Берник І.М. Критерії оцінки кавітаційної обробки технологічних середовищ. XXV Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ, 6 – 9 жовтня 2020 р.: Матеріали конференції. Київ, 2020. С. 326 – 328.

59. Луговской А.Ф., Чухраев Н.В. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях. К.: Київський університет. 2007. 245 с.

60. Долинский А.А., Г.К. Иваницкий. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. К.: “Наукова думка” 2008. 381 с.

61. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах К. : Вища школа. Изд-во при Киев. Ун-тет, 1984. 68 с.

62. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. Монографія. Тернопіль: Видавництво ТДТУ ім. І Пулюя, 2009. 224 с.

63. Zavialov V., Misyura T., Popova N., Zaporozhets Y., Dekanskiy V. Investigation of hydrodynamics during continuous vibroextraction in a liquid–Solid body system. Lecture Notes in Mechanical Engineering Advances in Design, Simulation and Manufacturing. Springer International Publishing. 2018. P. 524-535.

64. Zavialov V., Mysiura T., Popova N., Sukmanov V., Chornyi V. Regularities of solid-phase continuous vibration extraction and prospects for its industrial use. Lecture Notes in Mechanical Engineering Advances in Design,

Simulation and Manufacturing II. Springer International Publishing. 2019, P. 920-930.

65. Литвиненко О.А., Некоз О.І., Немирович П.М., Кондрат З. К.Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості: РВЦ УДХТ, 1999. 87 с.

66. Pavlenko I., Liaposhchenko A., Ochowiak M., Demyanenko M. Solving the Stationary Hydroaeroelasticity Problem for Dynamic Deflection Elements of Separation Devices. Vibrations in Physical Systems. 2018. Vol. 29. P. 1-9.

67. Sklabinskyi V., Liaposhchenko O., Pavlenko I., Lytvynenko O., Demianenko M. Modelling of Liquid's Distribution and Migration in the Fibrous Filter Layer in the Process of Inertial-Filtering Separation. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. 2019. P. 489-497.

68. Лубе В.М. Опыт промышленных исследований низкочастотных упругих колебаний для получения эмульсии для сахарного печенья. *Хлебопекарная и кондитерская промышленность*. М.: ЦИНТИпищепром, 1967, №2. С.23-24.

69. Рогов И.А., Горбатов А.В. Физические методы обработки пищевых продуктов. *Пищевая промышленность*. М.: ЦИНТИпищепром, 1974. С. 38-41.

70. Нопов К.И. Получение маргариновых эмульсий ультразвуком. *Маслобойно-жировое дело*. М.: ЦИНТИпищепром, 1936. С. 397-399.

71. Твердохлеб Т.Г. Эмульгирование молочного жира ультразвуком. *Молочная промышленность*. М.: ЦИНТИпищепром, 1958. Т. 3. С. 30-34.

72. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. М.А. Промтов. *Вестник Тамбовского гос.тех. университета*. №4. 2008. С. 861 – 869.

73. Хмелев, В.Н. Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. *Алт. гос. техн. ун-т, БТИ*. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 203 с.
74. Л.Д. Розенберг. Физика и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии М.: Наука, 1970. 685 с.
75. Juan A. Gallego-Juarez High-power ultrasonic processing: recent developments and prospective advances. *Physics Procedia* 3 (2010). P. 35–47.
76. Du T., Huang Ch., Wang Y. A Numerical Model for Evolution of Internal Structure of Cloud Cavitation. *ISROMAC-2016. (International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery)*. 2016. April. Hawaii, Honolulu. P. 10-15.
77. Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н., Эскин Г.И. Основы физики и техники ультразвука. М.: Высшая школа. 1987. 352 с.
78. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 280 с.
79. Федоткин И.М., Жарик Б.Н., Погоржельский Б.И. Интенсификация технологических процессов пищевых производств. К. : Техника, 1984. 176 с.
80. Федоткин И.М., Кравченко В.А., Маковецкий Л.П. Электрические явления в процессах тепломассообмена и влияние электрического поля. Мат. моделирование и системный анализ. Киев: Наукова думка. 1983. С. 122 – 125.
81. Орешина М.Н. Совершенствование способов гомогенизации эмульсий. *Сборник научных трудов*. Вып. 10. Воронеж : Воронеж, гос. технол. акад., 2000. С. 65–70.
82. Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. К. : АО "ГЛАЗ", 2000. 684с.
83. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983.- 191 с.

84. Сиротюк М.Г., Гаврилов Л.Р. Акустическая кавитация РАН. М.: Наука. 2008. 271с.
85. Сиротюк М.Г. Ультразвуковая кавитация. *Акуст. журн.* 1962, В. 8 (3). С. 255.
86. Сиротюк М.Г. Стабилизация газовых пузырьков в воде. *Акуст. Журн.* 1970. Т.16, вып.2. С.286 – 290.
87. Алексеев В.Н., Андреев В.Г., Романенко Г.А., Рыбак С.А. Исследование кавитационной области и эволюции акустического спектра. *Акуст. журн.* 2001. Т.47. N4. С.442-450.
88. By U. Parlitz, R. Mettin, S. Luther, I. Akhatov, M. Voss, W. Lauterborn. Spatio-temporal dynamics of acoustic cavitation bubble clouds *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 1999. №357. P. 313 -334
89. Максимов А.О. Спектральные акустические измерения при кавитации. Аналитическая модель. *Акуст. журн.* 2001. Т.47. N1. С.110-118.
90. Розин Ю.П., Розина Е.Ю. Влияние структуры и формы кавитационного облака на протекание физико-химических процессов. *ЖФХ* 1986, Т.60, №7. С. 1730-1738.
91. Tan Yuecan, Velkoff H.R. A Study of the Measurement of Cavitation Inception Using an Electrostatic Technique. *Transaction of the ASME, J. Basic Engng.* 1984, №1, С.158-166.
92. Басок Б.И. Разрушение дисперсной фазы во вскипающем потоке эмульсии. *Пром.теплотехника.* 1999. Т.21, №4-5. С.55-71.
93. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling characteristics of nano-fluids, *Int. J. Heat Mass Transfer* 2003. Vol. 46, P. 851-862.
94. Акуличев В.А., Алексеев В.Н. Акустические волны в жидкости с паровыми пузырьками. Нелинейные волновые процессы в двухфазных системах. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР. 1977. С.114-121.
95. Аванесов А.М., Кузнецов Г.Н. Динамика кавитационной полости в вязкой сжимаемой среде. *Акуст. Журн.* 1974. Т.20, вып.5. С. 657 – 662.

96. Капустина О.А. Газовый пузырек в звуковом поле малой амплитуды. *Акуст. журн.* - 1969. Т.15, вып.4. С.489-504.
97. Кузнецов Г.Н., Щеткин И.Б. Влияние вязкости на динамику захлопувающей полости, движущейся поступательно. *Акуст. журн.* 1973. Т.19, вып.5. С.727 – 735.
98. Теляшов Л.Л., Охотин В.А., Полевик А.Г. Экспериментальное исследование стадии схлопывания парогазовой полости в воде. *Симпозиум по физике акуст. – гидродинам. явлений.* Сухуми, 17 – 21 нояб. 1975. М.: Наука, 1975. С. 118- 125.
99. Хмелев, В. Н., Князев А. Н., Барсуков Р.В., Шалунов А.В. Измерение параметров технологических сред, подвергаемых воздействию ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. *Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник.* Бийск, 2001. С. 262-267.
100. Промтов, М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестник Тамбовского гос.тех. университета.* 2008. №4. С. 861 – 869.
101. Хмелёв В.Н. Голых Р.Н., Шалунов А.В., Хмелёв С.С. Повышение эффективности ультразвукового воздействия на гетерогенные системы с несущей жидкой фазой высокой вязкости. *Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник».* 2013. №2. С. 10-15.
102. Дойников А.А., Завтрак С.Т. Учет сжимаемости жидкости в задаче о взаимодействии газовых пузырьков в поле звуковой волны. *Акустич. журн.* 1988. Т.34, №2. С.246-250.
103. Акуличев В.А., Алексеев В.Н., Наугольных К.А. О динамике паровых пузырьков в жидководородных ультразвуковых пузырьковых камерах. *Акуст. журн.* 1971. Т.17, №3. С. 356-354.
104. Kleiman J. Kudryavtsev Y., Lugovskoy A Benefits of ultrasonic peening treatment in fatigue improvement of welded elements. *Proceeding of the*

ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Engineering OMAE 2012. Jule 1–6, 2012. Rio de Janeiro, Brazil. P. 83–175.

105. Bretz N., Strobel J., Kaltenbacher M., Lerch R. Numerical simulation of ultrasonic waves in cavitating fluids with special consideration of ultrasonic cleaning. *IEEE Ultrasonics Symposium*. 2005. P. 703-706.

106. Derksen J. Simulations of thixotropic liquids. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 2009. P. 1-9.

107. Brennen C. E. Cavitation and bubble dynamics. New York: Oxford University Press, 1995. 294 p.

108. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Smerdina E. S. The Cavitation Spraying of the Viscous Liquids. International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2006. P. 269-273.

109. Шевчук Л.І., Старчевський В.Л. Кавітація. *Фізичні, хімічні, біологічні та технологічні аспекти*. монографія Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2014. 376 с.

110. Шевчук Л.І., Афтаназів І.С., Строган Вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії. *Український міжвідомчий науково-технічний збірник: Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2011. вип. 45.—С.374-379.

111. Santos H. M., Lodeiro C., Capelo-Maninez J.-L. The Power of Ultrasound.. *Ultrasound in Chemistry: Analytical Applications*. Edited by Jose-Luis Capelo-Martinez. 2009. P. 1-16.

112. Time R. W., Rabenjafimanantsoa H. Cavitation Bubble Regimes in Polymers and Viscous Fluids. A. *Annual transactions of the Nordic rheology society*. 2011. Vol. P. 19. – 12.

113. Бэтчелор Г. К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости. *Механика. Сб. переводов иностранных статей*. 1968. 3 (109). С. 65–89.
114. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейберг И. Р. Распространение волн в газо- и жидкостных средах. Новосибирск. Изд-во ИФТ АН СССР, 1983. 237 с.
115. Wood R. J., Lee J., Bussemake M. J. A parametric review of sonochemistry: Control and augmentation of sonochemical activity in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017. №38. P. 351-370.
116. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.
117. Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей. М.: Энергия, 1975. 352с.
118. Овчинников П.Ф. Виброреология. К.: Наукова думка, 1983. 272 с.
119. Смольский Б.М., Шульман З.П., Гориславец В.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно-вязкопластичных сред. Минск: Наука и техника, 1970. 250 с.
120. Кузнецов О.А., Волошин Е.В., Сагитов Р.Ф. Реология пищевых масс. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. 106 с.
121. Стебновский С.В. Обобщенная реологическая модель кавитирующих конденсированных сред. *Прикладная механика и техническая физика*. Т. 42. №3, 2001. С. 116–129.
122. Перник А.Д. Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1988. 438 с.
123. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. ч. 1. 464 с.
124. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
125. Ishida H., Nuntadusit C., Kimoto H. Cavitation bubble behavior near solid boundaries. In: Fourth International Symposium on Cavitation. Pasadena, USA, June 2001 (Caltech Library System, Digital Collections).

126. Заяс Ю. Ф. Ультразвук и его применение в технологических процессах мясной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1970. 291 с.
127. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И. П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
128. Агранат Б. А. Физические основы технологических процессов, протекающих в жидкой фазе с воздействием ультразвука. М.: Машиностроение, 1969. 237 с.
129. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Машиностроение, 2001. 260 с.
130. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. М.: Химия, 1986. 288 с.
131. Розенберг Л.Д. Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968. 265 с.
132. Хмелев, В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. *Алт. гос. техн. ун-т, БТИ*. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. 400 с.
133. Brujan, E.A., Williams P.R. Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids. *Rheology reviews*. The British Society of Rheology, 2005. P. 147-172.
134. Федоткин И.М., Козюк О.В. Эффективный метод интенсификации и управление работой гидродинамического реактора. *Химическое машиностроение*. 1986. Вып. 43. С. 4–7.
135. Федоткин И.М., Воробьев Е.И., Скорогодский Ю.В. Об использовании пульсаций в промышленном фильтровании. *Изв. Вузов СССР*. Пищевая технология, 1978. №4. С. 151–154.
136. Федоткин И.М. Физическое явление и эффекты в жидких средах, предсказание механизма их влияния на технологические процессы,

применение в технике. К.: Техника. Сб.: Химическое машиностроение. 1985. Вып 41. С. 7–10.

137. Физические величины: справочник. Под, ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова, М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

138. Михайлов, И.Г. Поглощение ультразвуковых волн в жидкостях. Успехи физических наук. Т. XXXV, 1948, вып. 1. 35 с.

139. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.

140. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 592 с.

141. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи. М.: Мир, 1972. 424 с.

142. Гатчек Э.Э. Вязкость жидкостей. М-Л.: ОНТ, 1935. 312 с.

143. Агранат Б.А, Башкиров В. И. Влияние статического давления на акустические свойства кавитирующей жидкости. *Акустический журнал*. 1969. Т.15. вып. 4. С. 605–607.

144. Сыротюк М.Г. Кавитационная прочность воды. *Труды акустического института*. 1969. Вып. 6. С. 5–15.

145. Розина Е. Ю. Звукокапилярный метод определения скорости звука в кавитирующей жидкости. *Акустичный весник*. 2005. Том 8. №4. С. 51–58.

146. Давиденко Л. А. Приведенные характеристики среды и акустического поля при кавитации. *Тр. Одес. политехн. ун-та*. Одесса, 2008. Вып. 1 (29). С. 245–250.

147. Карпман В. И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973. 475 с.

148. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964. 216 с.

149. Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. 224 с.

150. Олройд Дж.Г. Неньютоновское течение жидкостей и твёрдых тел. Реология: Теория и приложения. М.: 1962. С. 757-793.

151. Коренев Б.Г, Резников Л.М. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения.–М.: Наука. Гл. ред.. физ.-мат. лит., 1988. 304 с.
152. Писаренко Г.С. Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материалов. К.: Наук. думка, 1970. 375 с.
153. Ультразвуковая технология Под ред. Б.А. Аграната. М.: Металлургия, 1974. 505 с.
154. Фридман В.М. Физико-химическое действие ультразвука на гетерогенные процессы жидкостной обработки материалов. *Применение ультразвука в химико-технологических процессах*. М.:Наука, 1960. 280 с.
155. Кнэпп Р., Дейли Д., Хэммит Ф. Кавитация.. М.:Мир, 1974.–687 с.
156. Sukmanov V., Ukrainets A., Zavyalov V., Marynin A. Research of extraction of biologically active substances from grape pomace by subcritical water. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5. №11 (89). P. 70-80.
157. Pavlenko I., Sklabinskyi V., Pitel J., Židek K., Kuric I., Ivanov V., Skydanenko M., Liaposhchenko O. Effect of Superimposed Vibrations on Droplet Oscillation Modes in Prilling Process. *Processes*. 2020. 8(5), 566. P. 1-12.
158. Китайгородский Ю.И., Яхимович Д.Ф. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем. М.: Машиностроение, 1982. 56 с.
159. Hilgenfeldt S., Grossman S. and Lohse D. (1999). A simple explanation of light emission in sonoluminescence. *Nature*. 1999. V. 398. P. 402-405.
160. 101 Arakeri V. H. (2003). Sonoluminescence and bubble fusion. *Current science*. 2003. V. 85. №7. P. 911-916.
161. Barber B. P., Hiller R. A., Lofstedt R. et. al. (1997). Defining the unknowns of sonoluminescence. *Phys. Rep.* 1997. V.281. P. 65-143.
162. Toegel R., Stefan Luther S. and Lohse D. Viscosity Destabilizes Sonoluminescing Bubbles. *Phys. Rev. Lett.* 2006. V.96. 114–301.

163. 104 Задорский В.М. Интенсификация газожидкостных процессов химической технологии. К.: Техніка, 1979. 197с.
164. Moshaii A. and Sadighi-Bonabi R. Role of liquid compressional viscosity in the dynamics of a sonoluminescing bubble. *Phys. Rev. E*. 2004. V. 70. P. 160–304.
165. Bogoyavlenskiy V.A. Differential criterion of a bubble collapse in viscous liquids. *Phys. Rev. E*. 1999. V.60. P. 504–508.
166. Nigmatulin R.I, Akhatov I. Sh., Topolnikov A.S. et al. (2005). Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion. *Phys. Fluids*. 2005. V. 17. P. 107106.
167. Moss W.C., Clarke D.B., White J.W. and Young D. A. Hydrodynamic simulations of bubble collapse and picosecond sonoluminescence. *Physics of Fluids*. 1994. V.6. № 9. P. 2979-2985.
168. Kyuichi Yasui. Alternative model of single-bubble sonoluminescence. *Phys. Rev. E*. 1997. V. 56. P.6750–6760.
169. А. Ляшок, О. Яхно, А. Луговской. Энергетическая модель процесса ультразвукового распыления в тонком слое. *MOTROL*. 2013, VOL 15 № 5. С. 91 – 97.
170. Vuong V. Q., Szeri A. J. and Young D. A. (1999). Shock formation within sonoluminescence bubbles. *Phys. Fluids*. 1999. V.11. P. 10-17.
171. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М: Наука, 1966. 688 с
172. Акуличев В. А. Пульсации кавитационных полостей. *Физические основы ультразвуковой технологии*. М.: Наука, 1970. С. 129-167.
173. Kear B.H , Colaizzi J., Mayo W.E., Liao S.-C On the Processing of Nanocrystalline and Nanocomposite Ceramics. *Scripta Materialia*. 2001. V. 44. Nos. 8/9. P. 2065 – 2068.
174. Lezzi A, Prosperetti A. Bubble dynamics in a compressible liquid. Part 2. Second-order theory. *J. Fluid Mech*. 1987, 185. P. 289–321.

175. Wang QX, Blake JR. Non-spherical bubble dynamics in a compressible liquid. Part 2. Acoustic standing wave. *J. Fluid Mech.* 2011, 679. С. 559–581.

176. Маргулис М. А., Маргулис И. М. Динамика ансамбля пузырьков в кавитирующей жидкости. *Журнал физической химии.* 2007. Т. 81. №12. С. 2290-2295.

177. Шестаков С. Д. Многопузырьковая акустическая кавитация: математическая модель и физическое подобие. *Электронный журнал. "Техническая акустика"*. 2010. №14. 16 с.

178. Когарко Б. С. Об одной модели кавитирующей жидкости. *Доклады АН СССР.* 1961. Т. 137. вып. 6. С. 1331–1333.

179. Аганин А.А., Ильгамов М. А. Динамика газового пузырька при возбуждении импульсами сжатия и разрежения в жидкости. *ДАН.* 2002. Т. 382. № 2. С. 176-180.

180. Шевчук Л.І., Афтаназів І.С., Строган О.І., Старчевський В.Л. Низькочастотні віброрезонансні кавітатори. Львів, 2013. 214с.

181. Лукьянченко М. Джелял А., Струбагин А. Влияние технологических параметров на прочность различных видов вяжущих при ультразвуковой обработке водотвердых суспензий. *Motorol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture.* 2013. Vol. 15. №5. 17–22.

182. Физика и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. под ред. Л.Д. Розенберга. М.:Наука, 1970. 685 с

183. Gómezy E., Montero F. Piezoelectric transducers for air-coupled operation in the frequency range 0.3-2.5 MHz. *IEEE International Ultrasonics Symposium, Atlanta, 2001.* P. 7-10

184. Теумин И. И. Ультразвуковые колебательные системы. М.: МАШГИЗ, 1959. 331 с.

185. Тимошенко С.П. Янг Д.У., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение. 1985. 427с.

186. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем. *Навчальний посібник (2-е видання)*. К.: Видавничий Дім «Слово». 440с.
187. Hielscher - Ultrasound Technology. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.hielscher.com.
188. Ultrasonic technologies. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.mastersonics.com/.
189. Ультразвуковая техника Инлаб. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.utinlab.ru/>.
190. Ультразвуковая техника. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.gz-pulsar.ru.
191. Гершгал, Д.А. Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. М.: Энергия. 1987. 318 с.
192. Берник І.М. Ультразвукова кавітаційна технологія вилучення пектину з рослинної сировини та обладнання для її реалізації: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Київ, 2010. 204 с.
193. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия, 1990. 206 с.
194. Задорский В.М. Интенсификация газожидкостных процессов химической технологии. К.: Техніка, 1979. 198 с.
195. Zhang S., Dunkan J.H., Chahine G.L. The final stage of the collapse of cavitation bubble near a rigid wall // *J.Fluid Mech.* Vol.257. 1993. P. 147–183.
196. Эльпинер И.Е. Ультразвук. *Физико-химическое и биологическое действие*. М.: Физматгиз. 1963. 420 с.
197. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1984. 400 с
198. Mashara Kameka, Yoishira Matsumoto. Nonlinear oscillation of spherical gas bubble in acoustic fields. *J.Acost.Soc.Amer.* 1999. V.106. №6. P. 3156-3166.

199. Зарембо Л.Н., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 319 с
200. Pereira AH, Tirapelli CB, Rodolpho LA. Ultrasonic dental scaler performance assessment with an innovative cavitometer. *American Journal of Applied Sciences*. 2010. Vol. 7, iss. 3. P. 290-300.
201. Tzanakis IA, Eskin DG, Georgoulas AB, Fytanidis DK Incubation pit analysis and calculation of the hydrodynamic impact pressure from the implosion of an acoustic cavitation bubble. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21, iss. 2. P. 866-878.
202. Sijl J., Vos HJ, Rozendal T., de Jong N., Lohse D., Versluis M. Combined optical and acoustic detection of single microbubble dynamics. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2011. Vol. 130, iss. 5. P. 3271-3281.
203. Son E., Lim M., Khim J., Ashokkumar M. Acoustic emission spectra and sonochemical activity in a 36 kHz sonoreaktor. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2012, vol. 19, iss. 1, P. 16-21.
204. Suslick K.S. Sonochemistry. *Science*. 1990. Vol. 247, March. P. 1439-1445.
205. Экнадиосянц, О. К. Получение аэрозолей. *Физические основы ультразвуковой технологии*. М.: Наука, 1970. С. 337-395.
206. Экнадиосянц, О. К. О кинетике ультразвукового туманообразования. *Акустический журнал*. 1963. Т. 9, № 2. С. 247.
207. Мэзон, У. Физическая акустика. Методы и приборы ультразвуковых исследований, М.: Мир. – 1966. – Т.1 – С. 327-397.
208. Экнадиосянц, О. К., Рильин Б. И. К вопросу о природе распыления жидкостей в ультразвуковом фонтане. *Акустический журнал*. 1966. Т. 12, № 3. С. 310.
209. Rajagopal E.S. Particulate size distributions in ultrasonic emulsification. *Proc. Ind. Acad. Sci.* 1957. V. 17. N24. P. 333-339.
210. Китайгородский Ю.И., Яхимович Д.Ф. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем. М.: Машиностроение, 1982. 56 с.

211. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tchyganok S.N. Ultrasonic Installation for Regeneration of Cutting Emulsion. *Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2004: Workshop Proceedings*. Novosibirsk: NSTU, 2004. P.194-196.
212. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н. Ультразвуковая установка для регенерации смазочно-охлаждающих жидкостей. *Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: материалы 4-ой Всероссийской научно-практической конференции*. Бийск: АлтГТУ, 2004. С. 173-178.
213. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестник Тамбовского гос.тех. университета*. 2008. №4. с.861–869.
214. Заяс Ю.Ф. Интенсификация технологических процессов при помощи ультразвука. *Пищевая промышленность*. 1960. № 3(16). С. 21–28.
215. Аксельруд, Г. А., Молчанов А.Д. Растворение твердых веществ. М.: Химия, 1977. 272 с.
216. Здановский, А.Б. Кинетика растворения природных солей в условиях вынужденной конвекции. Л.: Госхимиздат, 1956.–220 с.
217. Недужий С.А. О зависимости процесса образования эмульсии от интенсивности ультразвука. *Акуст. журн.* 1963. Т.9. №1. С. 125-126.
218. Эльпинер, И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. М.: Гос. изд-во физико-математической литературы. 1963. 420 с.
219. Афтаназів Л.І., Старчевський В.Л. Вплив ультразвуку на процес окислення органічних домішок у стічних водах. *Вісн.Держ. ун-ту «Львівська політехніка»*. 1988. №339. С. 238.
220. Schmidt, G. Die mechanische Natur des Abbaus von Makromolekullen mit Ultraschall. G. Schmidt, P. Paret. *Kolloid Z.* P. 124. - 150.
221. Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. М.:Наука, 1969. 689 с.

222. Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для вузов. М.: Химия, 1988. 464 с
223. Mashara Kameka, Yoishira Matsumoto. Nonlinear oscillation of spherical gas bubble in acoustic fields. J.Acost.Soc.Amer. 1999. V.106. №6. P.3156-3166.
224. Derksen, J. Simulations of thixotropic liquids. Submitted to Canadian Journal of Chemical Engineering (WCCE8-CFD issue) February 2010, 27 p.
225. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 2009. P. 1-9.
226. Ikesue A., Aung V.L., Taira T., Kamimura T., Voshid K., Messing G.L. Progress in ceramic lasers. Annu. Rev. Mater. Res. 2006. 36. P.397 – 429.
227. Бойко Г.П., Полониченко И.Д., Рогушина Ю.В., Бойко Л.Г. Нелинейные акустические эффекты в материало- и энергосберегающих химико-технологических процессах. *Кавитация. Экотехнология и ресурсосбережение*. 2002. №1. С.34-37.
228. Lugovskoy A, Lyashok A.. Physical analogue of the process of ultrasonic liquid nebulization in a thin layer. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування*. Київ, 2013. № 67 . С. 110 – 115.
229. Третинник В.Ю., Теселкин В.В., Симуров В.В., Яременко В.А. Ультразвуковая обработка и лазерная диагностика тиксотропных структур, формирующихся в водных суспензиях природных силикатов. *Экотехнология и ресурсосбережение*. 2002. №1. С.34-37.
230. Добаткин В.И., Эскин Г.И., Абрамов О.В. и др. Воздействие ультразвука на межфазную поверхность металлов и сплавов. М.: 1986. 76 с.
231. Kim H.Y., Kim Yi.G., Kang B.H. Enhanceent of natural convection and pool boiling heat transfer via ultrasonic vibration. Int. J Heat Mass Trans. 2004. Vol. 47, June. P. 2831-2840.

232. Луговской А.Ф., Гришко И.А. Проблемы создания технологического оборудования для ультразвукового кавитационного обеззараживания воды. / Промислова гідраліка і пневматика. № 4 (26). 2009. С. 3–6.

233. Прохоренко П.П., Дежкунов Н.В., Коновалов Г.Е. Ультразвуковой капиллярный эффект. Минск. 1981. 137 с.

234. Розіна О.Ю. Локальна зміна електричних властивостей рідини в ультразвуковому полі. УФЖ. 2002. Т.47, №2. С. 161-166.

235. Розіна О.Ю. Капиллярно-вибрационное распыление жидкости. *Акуст. вісник*. 2002.Т.5, №2. С.43-53.

236. Матвієнко М.П. Основи електротехніки. Підручник К.: Видавництво Ліра. К. 2017. 228 с.

237. Komarov S., Oda K., Ishiwata Y., Dezhkunov N. Characterization of acoustic cavitation in water and molten aluminum alloy. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2013. Vol. 20, iss. 2. P.754-761.

238. Физика и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1970. 685 с.

239. Pereira AH, Tirapelli CB, Rodolpho LA Ultrasonic dental scaler performance assessment with an innovative cavitometer. *American Journal of Applied Sciences*. 2010. Vol. 7, iss. 3. P. 290-300.

240. Tzanakis IA, Eskin DG, Georgoulas AB, Fytanidis DK Incubation pit analysis and calculation of the hydrodynamic impact pressure from the implosion of an acoustic cavitation bubble. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21, iss. 2. P. 866 -878.

241. Sijl J., Vos HJ, Rozendal T., de Jong N., Lohse D., Versluis M. Combined optical and acoustical detection of single microbubble dynamics. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2011. Vol. 130, iss. 5. P. 3271-3281.

242. Физика и техника мощного ультразвука. В 3 т. Т. 2. Мощные ультразвуковые поля. Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. 267 с.

243. Скворцов С.П., Нечаев В.И., Масленков Н.С., Кравченко А.П. Экспериментальное модели пульсации пузырьков в ультразвуковой кавитационной области. 16-я Международная научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья»: матер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.э. Баумана, 2014. С.36-38.
244. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник. М.: Высшая школа, 1991. 1232 С.
245. Пасынский А.Г. Поверхностные явления: учеб. пособие / под ред. акад. В.А. Каргина. М.: Высшая школа, 1959. 265 с.
246. Маргулис И.М., Маргулис М.А. Измерения акустической мощности при исследовании кавитационных процессов. *Акустический журнал*. 2005. Т. 1, № 6. С. 802-812.
247. Скворцов С.П., Змиевской Г.Н., Воронин А.А. Оптический контроль кавитационных эффектов низкочастотного ультразвука. 3-я Российская научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья»: матер. Ч.1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.э. Баумана, 2001. С. 38.
248. Змиевской Г.Н., Ломакин А.А., Терешкина Д.В., Скворцов С.П. Оптический контроль параметров кавитирующей среды в ультразвуковой хирургии. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2003. № 9. С. 18-25.
249. Скоков В.Н., Решетников А.В., Виноградов А.В., Коверда В.П. Динамика флуктуаций и спектры при акустической кавитации жидкостей. *Акустический журнал*. 2007. Т. 53, № 2. С. 168-172.
250. Келлер О.К., Кратиш Г.С., Луб'яницкий Г.Д. Ультразвуковое очищения. Л.: Машинобудоування, 1977. 184 с.
251. Змиевской Г.Н., Ломакин А.А., Терешкина Д.В., Скворцов С.П. Оптический контроль параметров кавитирующей среды в ультразвуковой хирургии. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2003. № 9. С. 18-25.
252. Змиевской Г.Н., Крылов Ю.В., Скворцов С.П. Исследования возможностей оптического зондирования кавитирующей жидкости при

ультразвуковом воздействии. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2006. № 10. С. 32-36.

253. De M.K., Hammitt F.G. New method for monitoring and correlation cavitation noise to erosion capability. *Trans. ASME, J.Fluid Engng.* 1982. V.104. N4. P.95-105.

254. Максимов А.О. Спектральные акустические измерения при кавитации. Аналитическая модель. *Акуст. журн.* 2001. Т.47. N1. С.110-118.

255. Holt R.G., Crum L.A. Acoustically forced oscillations of air bubble in water. Experimental results. *J.Acost. Soc. Amer.* 1992. Vol. 91. P. 1924-1932.

256. Mashara Kameka, Yoishira Matsumoto. Nonlinear oscillation of spherical gas bubble in acoustic fields. *J.Acost.Soc.Amer.* 1999. V.106. №6. P. 3156-3166.

257. Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия. М.: Металлургия, 1988. 232 с.

258. Tan Yuecan, Velkoff H.R. A Study of the Measurement of Cavitation Inception Using an Electrostatic Technique. *Transaction of the ASME, J. Basic Engng.* 1984, №1. С.158-166.

259. Агрест Э.М., Корец В.Л. Крупномасштабные пространственные осцилляции кавитационной полости в звуковом поле. *Акуст. журн.* 1978. Т.24. №1. С. 1-9.

260. Zmievskoy G., Skvortsov S. Ultrasound Cavitation Detection by Means of Optical Probing. *Proceedings of 6th Russian-Bavarian Conference on Biomedical Engineering.* Moscow, 2010. P. 121-122.

261. Брандт Н. Б., Яковлев А. Д., Пешковський С. Л. Второй порог акустической кавитации. *Письма в ЖТФ.* 1975. Т. 10. С. 460-463.

262. Монахов В. П., Пешковський С. Л, Попович А. С. К вопросу о втором пороге ультразвуковой кавитации в воде. і інш. *Акуст. ж.* 1975, 21 (3). С. 432-435.

263. Рождественский В.В. Кавитация. Л.:Судостроение, 1977. 246 с.

264. Derksen J. Simulations of thixotropic liquids. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 2009. P. 1-9.
265. Гончарук В.В., Маляренко В.В., Яременко В.А. О механизме действия ультразвука на водные системы. Химия и технология воды. 2004. Т.26. №3. С.275-286.
266. Brennen C. E. Cavitation and bubble dynamics. New York: Oxford University Press. 1995. 294 p.
267. Пановко Я. Г. Внутреннее трение при упругих колебаниях. М.Физматгиз,1960. 123с.
268. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высш.школа,1978. 448с
269. Gibson J. H., Hon H., Farnood R., Droppo I. G., P. Seto. Effects of ultrasound on suspended particles in municipal wastewater. *Water Res.* 2009. vol. 43. P. 2251 – 2259.
270. HaoY. and Prosperetti A.(1999). The effect of viscosity on the spherical stability of oscillating gas bubbles. *Physics of Fluids*. 1999. V.11. № 6. P. 1309-1317.
271. Bogoyavlenskiy V.A. (2000). Single-bubble sonoluminescence: Shape stability analysis of collapse dynamics in a semianalytical approach. *Physical review*. 2000. V.62, №2.- P. 2158-2167.
272. Мощные ультразвуковые поля. под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. 268 с.
273. Сорокин Е.С. Внутреннее и внешнее сопротивление при колебаниях твердых тел. М.: Госстройиздат, 1957. 66с.
274. Bogoyavlenskiy V.A. Differential criterion of a bubble collapse in viscous liquids. *Phys. Rev. E*. 1999. V.60. P. 504–508.
275. Забабахин Е. И. Заполнение пузырьков в вязкой жидкости. ПММ. 1960. Т. 24. №6. С. 1129-1131.
276. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М: Наука, 1966. 688 с.

277. Смородов Е.А., Галиахметов Р.Н. Экспериментальное обнаружение. Прикладная физика. 2006. №4. С. 5-11.
278. Toegel R., Stefan Luther S. and Lohse D. (2006). Viscosity Destabilizes Sonoluminescing Bubbles. Phys. Rev. Lett. 2006. V.96. 114–301.
279. Красильников В. А., Кузнецов В. П. Распространение нелинейных звуковых волн в жидкости при кавитации. *Акустический журнал*. № 20 (3). 1974. С. 473–477.
280. Kolesnikov A. Ultrasound measurements. 2 nd ed., Revised. and additional. M.: Izd. of Standards, 1982. 248 p.
281. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. М.: Машиностроение, 1976. 320 с.
282. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: Справочник. К.: Наук. думка, 1971. 375 с.
283. Грінченко В.Т., Дідковський В.С., Маципура В.Т. Теоретичні основи акустики: Навчальний посібник.- К.: ІЗМН, 1009.- 376 с.
284. Кушлик-Дивульська О. І., Поліщук Н. В., Орел Б. П. та інш. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб. К: НТУУ «КП», 2014. 212 с.
285. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: Львів: ЛьвДУВС, 2017. 292 с.
286. Вітенько Т.М. Розподіл енергії при активації води в умовах кавітаційного перемішування. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 2006. Т. 11, № 4. С. 214 – 219.
287. Сиротюк М.Г. Об энергетике и динамике кавитационной области. *Акустический журнал*. 1967. Т. 13, вып. 2. С. 265-269.
288. Морозов В.П. Численный анализ изучения звука сферической каверной. *Тр.Акуст.ин-та*. 1969. Вып.7.С.115-116.

289. Монахов В.Н., Пешковский С.Л. Излучение ультразвука в кавитирующую жидкость. Повышение эффективности технологических процессов. М.: Металлургия. 1981. С. 14-18.
290. Сорока К.О. Основы теорії систем і системного аналізу: Навчальний посібник. – ХНАМГ, 2004. 291 с.
291. K.E. Morgan, Experimental and theoretical evaluation of ultrasonic contrast agent behavior. Ph. D dissertation, University of Virginia, UMI Dissertation Services, Ann Arbor, Michigan, USA 2001.
292. Пешковский С.Л., Яковлев А.Д., Исследование кавитационной области. *Акустический журнал*. 1967. Т. 22, вып. 23. С. 422-426.
293. Niemczewski B. Maximisation of cavitation intensity in ultrasonic cleaning in aqueous solutions through selection of salt solution. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 2011. Vol. 89, iss. 2. P. 104-108.
294. Бойко Г.П., Полониченко И.Д., Рогушина Ю.В., Бойко Л.Г. Нелинейные акустические эффекты в материало- и энергосберегающих химико-технологических процессах. Кавитация. Экотехнология и ресурсосбережение. 2002. №1. С. 34-37
295. Macedo R., Verhaagen B., Rivas DF, Versluis M., Wesselink P., van der Sluis L. Cavitation measurement during sonic and ultrasonic activated irrigation. *Journal of Endodontics*. 2014. Vol. 40, iss. 4. P. 580-583.
296. Hueter TF, Bolt RH Sonics. Techniques for the use of sound and ultrasound in engineering and science. NY: John Wiley & Sons. London: Chapman & Hall, 1955. 456 p.
297. Смородов Е.А., Галиахметов Р.Н., Ильгамов М.А. Физика и химия кавитации. М.: Наука. 2008. 226с.
298. Луговський О.Ф. Підвищення ефективності апаратних засобів для реалізації ультразвукових кавітаційних технологій: дис. доктора тех. наук: 05.05.13 К., 2005. 273 с.
299. Simon G. and Levinsen M. T. Parametric dependence of single bubble sonoluminescence spectra. *Phys. Rev. E*. 2003. V.68. 146–307.

300. Toegel R. and Lohse D. (2003). Phase diagrams for sonoluminescing bubbles: A comparison between experiment and theory. *J. Chem. Phys.* 2003. V.118. № 4. P. 1863-1875.
301. Ruuth S.J., Putterman S., and Merriman B. (2002). Molecular dynamics simulation of the response of a gas to a spherical piston: Implications for sonoluminescence. *Phys. Rev. E.* 2002. V.66. P.306-310.
302. Flannigan D.J. and Suslick K.S. (2005). Plasma Line Emission during Single-Bubble Cavitation. *Phys. Rev. Lett.* 2005. V95. 044–301.
303. Flannigan D.J. and Suslick K.S. (2005). Molecular and atomic emission during single bubble cavitation in concentrated sulfuric acid *Acoustics. Research Letters Online.* 2005. V 6. №3 P.157-161.
304. Hopkins S.D., Putterman S.J., Kappus B.A. et. al. (2005). Dynamics of a Sonoluminescing Bubble in Sulfuric Acid. *Phys. Rev. Lett.* 2005. V.95. P.254-301.
305. Wu C. C. and Roberts P. H. (1993). Shock-wave propagation in a sonoluminescing gas bubble. *Phys. Rev. Lett.* 1993. V.70. P. 3424–3427.
306. Wu C. C. and Roberts P. H. (1994). A model of sonoluminescence. *Proc.R. Soc. London, Ser. A.* 1994. V. 445. P.323–349.
307. Nigmatulin R.I, Akhatov I. Sh., Topolnikov A.S. et. al. (2005). Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion. *Phys. Fluids.* 2005. V. 17. P. 106-107.
308. Бурдо О.Г. Принципи харчових наноенерготехнологій. *Chemical Technology and Engineering (Хімічна технологія та інженерія): збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. 26–30 червня 2017 року, м. Львів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. С. 196–197.*
309. Thomas J.-L. Inhomogeneous pressure field inside a collapsing bubble accelerated by an acoustic pulse. *Phys. Rev. E.* 2004. V. 70. P. 303-305.
310. Thomas J.-L., Forterre Y., and Fink M. Boosting Sonoluminescence with a High-Intensity Ultrasonic Pulse Focused on the Bubble by an Adaptive Array. *Phys. Rev. Lett.* 2002. V.88. P. 302-304.

311. Kyuichi Yasui. Alternative model of single-bubble sonoluminescence. *Phys. Rev. E*. 1997. V. 56. P. 6750–6760.
312. Cheng H. Y., Chu M.-C., Leung P. T., and Yuan L. How important are shock waves to single-bubble sonoluminescence? *Phys. Rev. E*. 1998. V.58. P. 2705–2708.
313. Moss W.C., Clarke D.B., White J.W. and Young D. A. Hydrodynamic simulations of bubble collapse and picosecond sonoluminescence. *Physics of Fluids*. 1994. V.6. № 9. P. 2979-2985.
314. Vuong V. Q., Szeri A. J. and Young D. A. . Shock formation within sonoluminescence bubbles. *Phys. Fluids*. 1999. V.11. P. 10-17.
315. Plesset M.S., Prosperetti A. Bubble dynamics and cavitation. *Ann. Rev. Fluid Mech*. 1977. N 9. P.145–185.
316. Herring C.. Theory of the pulsations of the gas bubble produced by an underwater explosion. 1941. OSRD report 236.
317. Flynn H. G.. Cavitation dynamics. I. A mathematical formulation (in sound field). *J. Acoust. Soc. Am*. 1975. V. 57. P. 1379–1396.
318. Flynn H. G. . Cavitation dynamics. II. Free pulsations and models for cavitation bubbles. *J. Acoust. Soc. Am*. 1975. V.58. P.1160–1170.
319. Kirkwood J. G. and Bethe H. A. The pressure wave produced by an underwater explosion. OSRD.1942. P.558.
320. Яхно О.М., Луговський О.Ф. Фізична модель процесу ультразвукового розпилення у тонкому шарі. *Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції АС ПГП “Промислова гідраліка і пневматика”*. Чернігів, 2012. С. 28.
321. Санкин Г. Н. Динамика и свечение пузырькового кластера в фокусируемой биполярной акустической волне. Дисс. канд. физ.-мат. наук, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. Новосибирск. 2002. 121с.
322. Гаспарский В. Праксеологический анализ проектно-конструкторских разработок. М.: Мир, 1978. 172 с.

323. Benjamin TB, Ellis AT. The collapse of cavitation bubbles and the pressure thereby produced against solid boundaries. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1966, A 260, P.221–240.
324. Lauterborn W, Bolle H. Experimental investigations of cavitation-bubble collapse in the neighbourhood of a solid boundary. *J. Fluid Mech.* 1975. 72, P. 391–399.
325. Tomita Y, Shima A. Mechanisms of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse. *J. Fluid Mech.* 1986 , P. 535–564.
326. Vogel A, Schweiger P, Frieser A, Asiyo M, Birngruber R. Intraocular Nd:YAG laser surgery: damage mechanism, damage range and reduction of collateral effects. *IEEE J. Quant. Electron.* 26, 1990. P. 2240–2260.
327. Wang QX. Underwater explosion bubble dynamics in a compressible liquid. *Phys. Fluids* 2013, 25. P. 2104-2107.
328. A. Kubota, H. Kato. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section. *Journal of Fluids Engineering.* 111(3): 1989. P. 204-210.
329. C. L. Merkle, J. Feng, P. E. O. Buelow. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation. *Proceedings of 3rd International Symposium on Cavitation.* Grenoble. France. 1998.
330. R. F. Kunz, D. A. Boger, D. R. Stinebring, T. S. Chyczewski, J. W. Lindau, H. J. Gibeling, S. Venkateswaran, T. R. Govindan. A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction. *Computers and Fluids.* 2000. 29(8). P.849-875.
331. A. K. Singhal, M. M. Athavale, H. Li, Y. Jiang. Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. *Journal of Fluids Engineering.* 2002. 124 (3). P. 617-624.
332. C. Martínez-Bazán, J. L. Montañés, J. C. Lasheras. On the breakup of an air bubble injected into a fully developed turbulent flow. Part 1 Breakup frequency, *Journal of Fluid Mechanics.* 1999. 401. P.157–182.

333. C. Martínez-Bazán, J. L. Montañés, J. C. Lasheras. On the breakup of an air bubble injected into a fully developed turbulent flow. Part 2: Size pdf of the resulting daughter bubbles, *Journal of Fluid Mechanics*. 1999. 401. P.183-207.
334. G. M. Evans, P. M. Machniewski, A. K. Bin. Bubble size distribution and void fraction in the wake region below a ventilated gas cavity in downward pipe flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 2004. 82(A9). P.1095-1104.
335. V. A. Sosinovich, V. A. Tsyganov, B. A. Kolovandin, B. I. Puris, V. A. Gertsovich. Model of gas bubble breakup in turbulent liquid flow. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1995. 68(2). P.164-175.
336. G. E. Reisman, C. E. Brennen. Shock wave measurements in cloud cavitation. *Proceedings of 21st International Symposium on Shock Waves*. 1997. P. 1570-1577.
337. G. E. Reisman, Y. C. Wang, C. E. Brennen. Observations of shock waves in cloud cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*. 1998. P. 255-283.
338. L. Zhang, Z. Wen, X. Shao. Investigation of bubble-bubble interaction effect during the collapse of multi-bubble system. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2013. 45(6). P. 861-867.
339. Колесников, А. Е. Ультразвуковые измерения. М.: Издательство стандартов. 1970. 240 с.
340. Зубков, О. В. Полтавский К. Н., Сидоров Г. И. Метод высокоточного измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний движущихся средах. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. 2/9 (56). С. 8-11
341. Акуличев В.А. Пульсации кавитационных пузырьков. *Физика и техника мощного ультразвука: Мощные ультразвуковые поля*. М.:Наука,1968. Т. 2. С. 129-166.
342. Regulation (EC) No 853/2004 of the European parliament and of the council of 29 April 2004 laying down specific hygiene rules for on the hygiene of foodstuffs. *Official Journal of the European Union*. 2004. 151 p.

343. Палій А. П. Інноваційні основи одержання високоякісного молока. монографія. Х. : “Міськдрук”, 2016. 270 с.
344. Шугай М. О., Кігель Н. Ф. Безпечність та якість сиру: як поліпшити мікробіологічні показники молока-сировини. *Продовольчі ресурси*. 2013. № 1. С. 105-116.
345. Te Giffel M.C. Zwietering M.H. Validation of predictive models describing the growth of *Monocytogenes*. *International Journal of Food Microbiology*. 1999. № 46. P. 135–149.
346. Anderson R.E. Danoelsson G., Hedlund C.B., Svensson S.G. Effect of a heatresistant microbial lipase on flavour of Ultra-High temperature sterilized milk. *J. Dairy Sci*. 1981. № 64. P. 375–379.
347. Hanamant P.S., Bansilal G.M. Proteolityc psychrotrophic *Bacillus cereus* from milk and fermented milk products. *J. of Environmental Research And Development*. 2012. № 3. P. 660–666.
348. Флуер Ф.С. Энтеротоксины *Bacillus cereus*. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2007. № 2. С. 105–110.
349. ДСТУ 3662:2018 «Молоко-сировина коров'яче» (ДСТУ 3662-97 «Молоко коров'яче незбиране.Вимоги при закупівлі» із зміною №1 (ІПС №5–2007). К.: Держспоживстандарт України, 2007. 11 с.
350. Злепко С. М., Коваль Л. Г., Гаврілова Н. М., Тимчик І. С. Медична апаратура спеціального призначення: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2010. 160 с.
351. Regulation (EC) No 853/2004 of the european parliament and of the council of 29 April 2004 laying down specific hygiene rules for on the hygiene of foodstuffs. Official Journal of the European Union, 2004. 151 p.
352. Молохова Л.Г., Решетилов А.Е. Сравнительная оценка эффективности методов экстракции. Материалы 2 Всесоюзного съезд а фармацевтов. Рига. 1974. С. 90 – 91.

353. Баранов В.Н., Захаров Ю.Е. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы. Москва: Машиностроение, 1977. 326 с.
354. Симонюк В. П. До особливостей вибору приводу вібромашин з метою покращення перемішування робочих сумішей у вібробункері. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2013. 42. С. 262-266.
355. Бабенко Ю.И., Иванов Е.В. Экстрагирование. Теория и практические приложения. Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2009. 334 с.
356. Бауман К.В., Коц І.В. Кавітаційна технологія виготовлення бітумних емульсій. Вінниця: ВНТУ. 2013. 128 с.
357. Gryshko I., Luhovskyi A. Methods of microorganisms inactivation in the technological liquid. *Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. Серия машиностроение. Київ. 2015. Вип. 75. С. 165–171.
358. Kumar J. K., Pandit A. B. 2010. Cavitation – a New Horizon in Water Disinfection. Water disinfection by ultrasonic and hydrodynamic cavitation Verlag : VDM, 2010. P.304-308.
359. Промтов М. А., Алешин А. В., Колесникова М. М., Карпов Д. С. Обеззараживание сточных вод кавитационной обработкой. *Вестник ТГТУ*. Том 21. № 1. 2015. С. 105 –111.
360. Dular M., Griessler-Bulc T., Gutierrez I., Heath E., Kosjek T., Klemenčič A.K., Oder M., Petkovšek M., Rački N., Ravnikar M., Šarc A., Širok B., Zupanc M., Žitnik M., Kompare B. Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment, *Ultrasonic Sonochemistry*. Ultrasonics Sonochemistry. 2016, Vol. 29, March. P. 577–588
361. Vitenko, T.M., Gaschyn, O.R. The combined effects of hydrodynamic cavitation, hydrogen peroxide and silver ions on Escherichia Coli bacteria. *Jornal Chemistry and Technology of water*. Vol.4. 2016. P. 451-461.

362. Shevchuk L., Strogan O., Koval I. Equipment for magnetic-cavity water disinfection. *Chemistry & Chemical Technology*. №2(6). 2012. P. 219–223.

363. Gao S., Lewis G. D., Ashokkumar M., Y. Hemar Inactivation of microorganisms by low-frequency high-power ultrasound: A simple model for the inactivation mechanism. *Ultrason. Sonochem.*, vol. 21. 2014. P. 454 – 460.

364. Feng H., Barbosa-Cánovas G.V., Weiss J. *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. Food Engineering Series. Springer Science+Business Media, 2011. P. 665 -669.

ДОДАТОК А

ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ КАВІТАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ

Код програми в середовищі Matlab:

```
function varargout = Bernyk111(varargin)

% BERNYK111 MATLAB code for Bernyk111.fig

%   BERNYK111, by itself, creates a new BERNYK111 or raises the existing
%   singleton*.

%
%   H = BERNYK111 returns the handle to a new BERNYK111 or the handle to
%   the existing singleton*.

%
%   BERNYK111('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in BERNYK111.M with the given input
arguments.

%
%   BERNYK111('Property','Value',...) creates a new BERNYK111 or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Bernyk111_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Bernyk111_OpeningFcn via varargin.

%
```

```
%    *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%    instance to run (singleton)".
```

```
%
```

```
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
```

```
% Edit the above text to modify the response to help Bernyk111
```

```
% Last Modified by GUIDE v2.5 24-Apr-2018 12:02:44
```

```
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
```

```
gui_Singleton = 1;
```

```
gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Bernyk111_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Bernyk111_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
```

```
if nargin && ischar(varargin{1})
```

```
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
```

```
end
```

```
if narginout
```

```
    [varargout{1:narginout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
```

```

else

    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});

end

% End initialization code - DO NOT EDIT


% --- Executes just before Bernyk111 is made visible.
function Bernyk111_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% This function has no output args, see OutputFcn.

% hObject    handle to figure

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% varargin   command line arguments to Bernyk111 (see VARARGIN)


% Choose default command line output for Bernyk111
handles.output = hObject;


% Update handles structure
guidata(hObject, handles);


% UIWAIT makes Bernyk111 wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);


% --- Outputs from this function are returned to the command line.

```



```
function varargout = Bernyk111_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
```

```
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit2 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit2 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit3 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
    get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


% --- Executes on button press in pushbutton1.

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

c=str2double(get(handles.edit1,'String'));
f=str2double(get(handles.edit2,'String'));
lambda=str2double(get(handles.edit3,'String'));
ro=str2double(get(handles.edit5,'String'));
eta=str2double(get(handles.edit6,'String'));
sigma=str2double(get(handles.edit7,'String'));
I=str2double(get(handles.edit8,'String'));
Dk=str2double(get(handles.edit9,'String'));

w=2*pi*f;
T=2*pi/w;
sq=sqrt(2*I/ro/c);
A=I/w*sq;
vm=sq;
a=w*sq;
P=sqrt(2*ro*c*I);
set(handles.res,'String',w);
set(handles.resT,'String',T);
set(handles.resA,'String',A);
set(handles.resvm,'String',vm);
set(handles.resaa,'String',a);
set(handles.resP,'String',P);

```

```

function res_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to res (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of res as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of res as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function res_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to res (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit5 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit5 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit6 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit6 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```



```

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit7 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit7 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit8 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit8 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit9 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit9 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function resT_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resT (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of resT as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of resT as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function resT_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resT (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function resA_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resA (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of resA as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of resA as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function resA_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resA (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function resvm_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resvm1 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of resvm1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of resvm1 as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function resvm1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resvm1 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function resaa_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resaa (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of resaa as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of resaa as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function resaa_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resaa (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function resP_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resP (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of resP as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of resP as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function resP_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to resP (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.

```



```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function fn_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to fn (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of fn as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of fn as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function fn_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to fn (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

% See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),

get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

 set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

function fk_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to fk (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of fk as text

% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of fk as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function fk_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to fk (see GCBO)

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function fsh_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to fsh (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)


% Hints: get(hObject,'String') returns contents of fsh as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of fsh as a double


% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function fsh_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```
% hObject    handle to fsh (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
```

```
%      See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function in_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to in (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of in as text
```

```
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of in as a double
```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function in_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to in (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called


% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
    get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end


function ik_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to ik (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ik as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ik as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ik_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ik (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function ish_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ish (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ish as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ish as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function ish_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to ish (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
```

```
%      See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
```

```
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton2.
```

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

c=str2double(get(handles.edit1,'String'));

ro=str2double(get(handles.edit5,'String'));


fstart=str2double(get(handles.fn,'String'));
fend=str2double(get(handles.fk,'String'));
fstep=str2double(get(handles.fsh,'String'));
istart=str2double(get(handles.in,'String'));
iend=str2double(get(handles.ik,'String'));
istep=str2double(get(handles.ish,'String'));

[X,Y]=meshgrid(fstart:fstep:fend,istart:istep:iend);

w=2.*pi.*X;

sq=sqrt(2.*Y./ro./c);

A=Y./w.*sq;

vm=sq;

a=X.*sq;

P=sqrt(2.*ro.*c.*Y);

figure

subplot(2,2,1);mesh(X,Y,A),grid,

title('Амплитуда смещения'),xlabel('Частота'),ylabel('Интенсивность')

subplot(2,2,2);mesh(X,Y,vm),grid,

title('Скорость'),xlabel('Частота'),ylabel('Интенсивность')

```



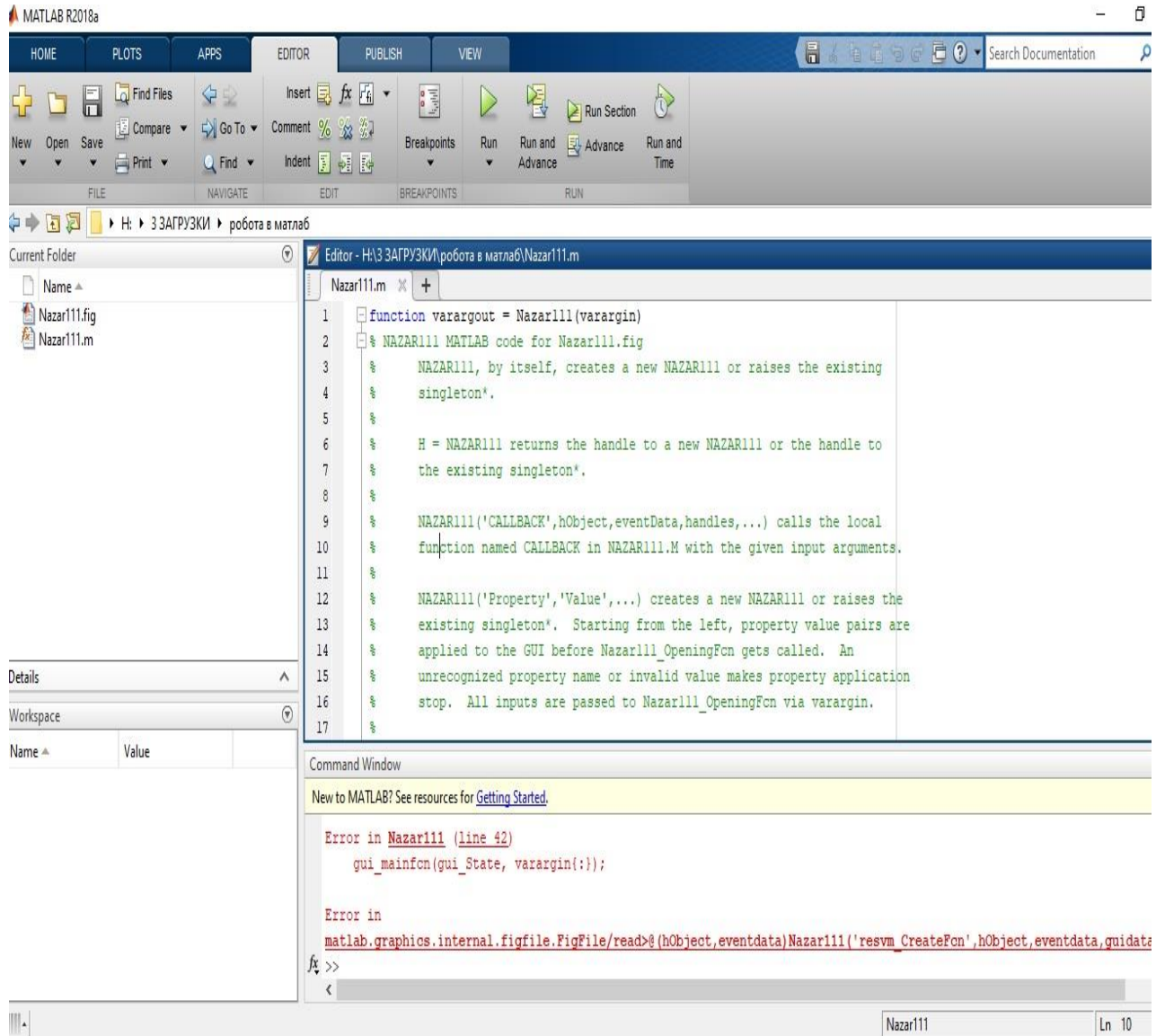
```

subplot(2,2,3);mesh(X,Y,a),grid,
title('Ускорение'),xlabel('Частота'),ylabel('Интенсивность')
subplot(2,2,4);mesh(X,Y,P),grid,
title('Акустическое давление'),xlabel('Частота'),ylabel('Интенсивность')
%Вычисление градиентов
Dk=str2double(get(handles.edit9,'String'));
dA=-Y./w.^2.*sq+3/2./w.*sq;
dvm=1/2./Y.*sq;
da=sq+1/2./Y.*sq;
dP=sqrt(ro.*c./Y/2);
figure,
subplot(2,2,1);mesh(dA,X,Y);title('Градиент амплитуды смещения')
subplot(2,2,2);plot(dvm,Y);title('Градиент скорости')
subplot(2,2,3);mesh(da,X,Y);title('Градиент ускорения')
subplot(2,2,4);plot(dP,Y);title('Градиент акустического давления')

```

ДОДАТОК Б

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ НА РІЗНИХ СТАДІЯХ КАВІТАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ В МАТЛАБ

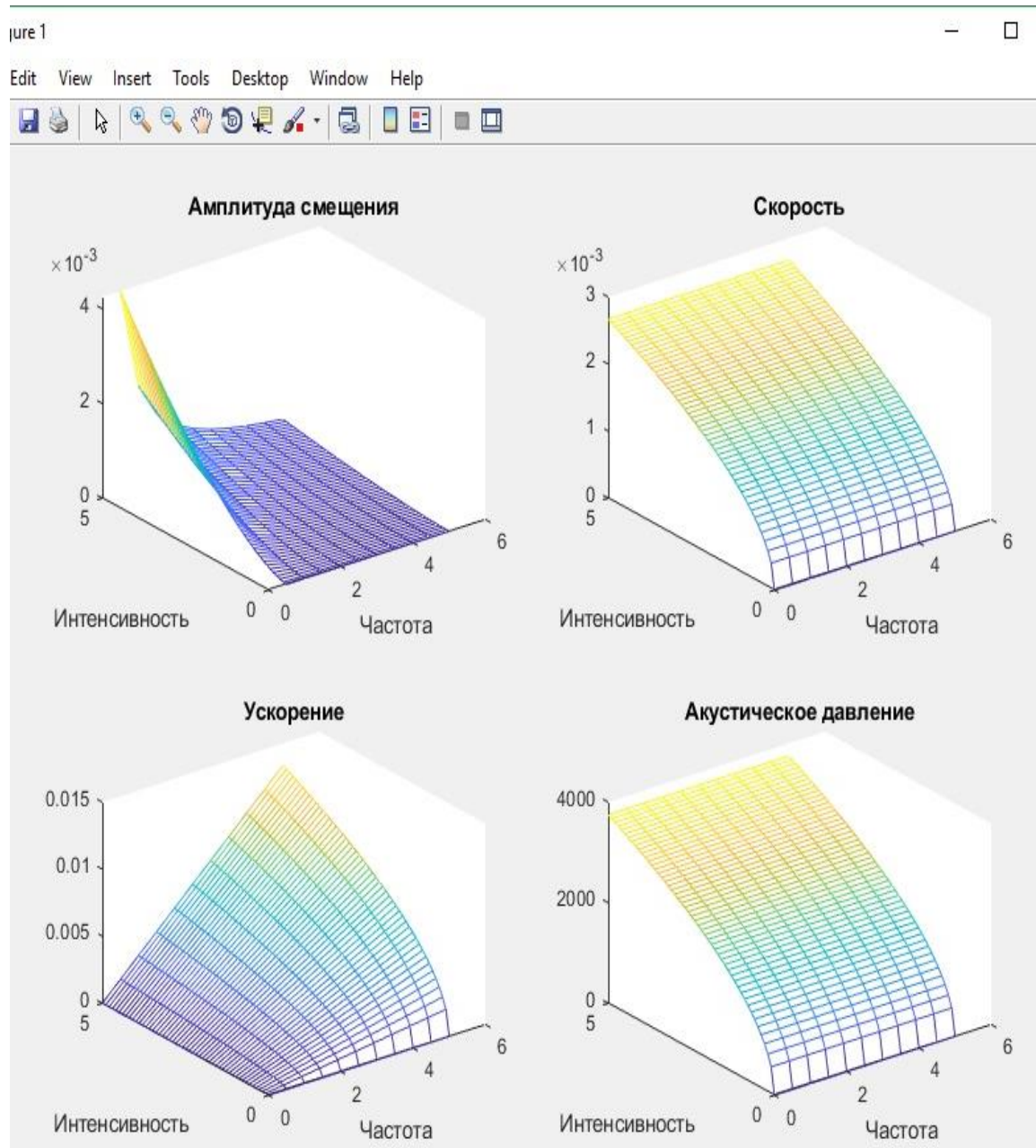


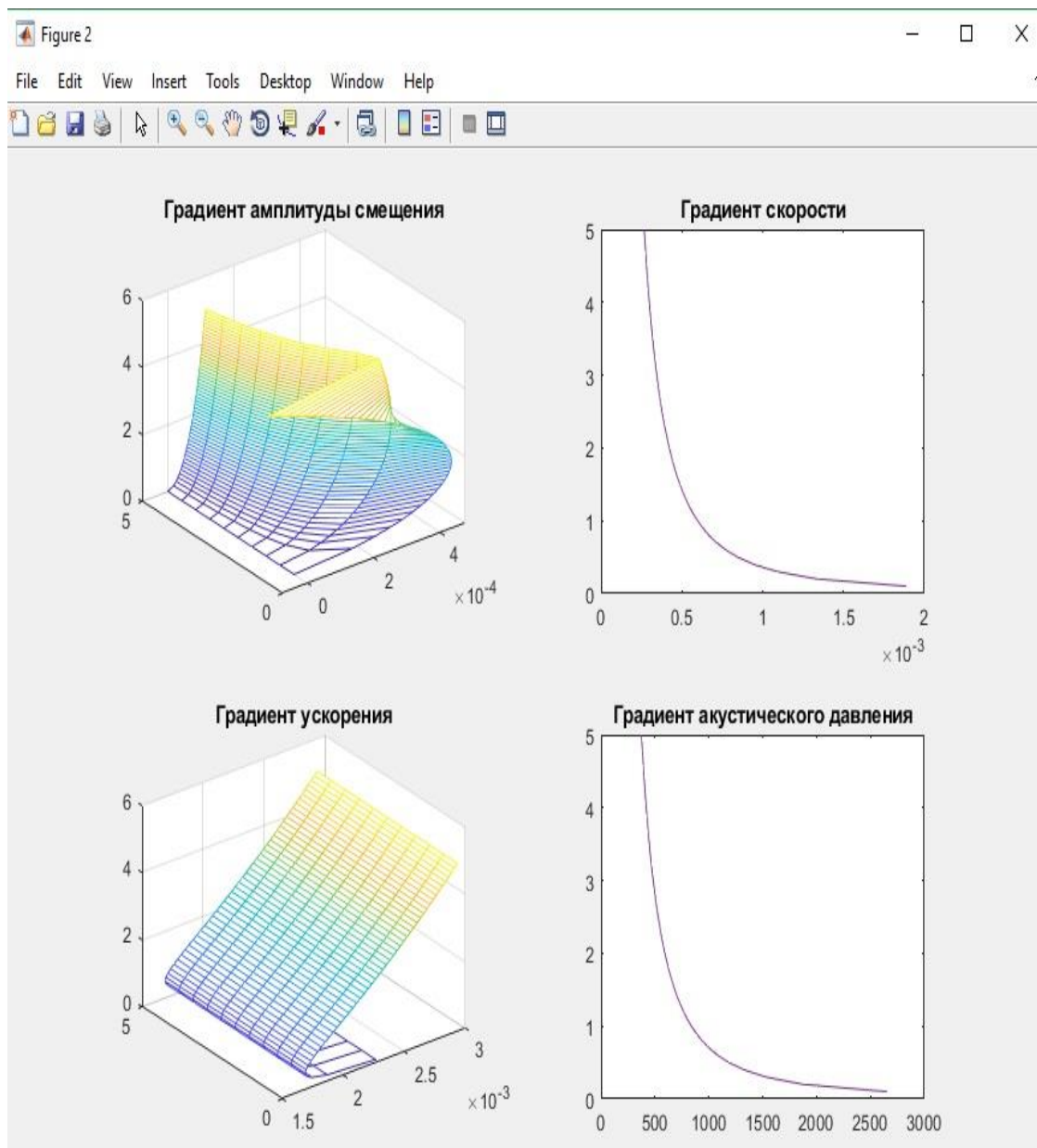
Швидкість - 1500 м/с

Входные данные		Расчетные		
c=	1500	скорость распространения упругой	w= 6.28319	угловая
f=	1000000	частот	T= 1e-06	период
lambda	0.015	длина волны	A= 0.00018	амплитуда смещения частиц в клетке
rho=	936	плотно	vm= 0.11935	амплитуда скорости частиц в клетке
eta=	0.82E-3	вязкос	a= 749914	амплитуда ускорения частиц в клетке
sigma=	73.0E-3	поверхностное	P= 167571	акустическое давление частиц
I=	1E4	интенсивность ультразвуковой		
Dk=	5E-4	диаметр		

Построение			
Диапазон частот	начальное	0	шаг
	конечное	5	0.5
Диапазон интенсивности волны	начальное	0	шаг
	конечное	5	0.1

Расчет
Построить граф...





Швидкість - 500 м/с

Входные данные		Расчетные		
c=	500	скорость распространения упругой	w= 6.28319	угловая
f=	1000000	частот	T= 1e-06	период
lambda	0.015	длина волны	A= 0.00032	амплитуда смещения частиц в клетке
rho=	936	плотно	vm= 0.20672	амплитуда скорости частиц в клетке
eta=	0.82E-3	вязкос	a= 1.29889	амплитуда ускорения частиц в клетке
sigma=	73.0E-3	поверхностное	P= 96747.1	акустическое давление частиц
I=	1E4	интенсивность ультразвуковой		
Dk=	5E-4	диаметр		

Построение			
Диапазон частот	начальное	0	шаг
	конечное	5	0.5
Диапазон интенсивности волны	начальное	0	шаг
	конечное	5	0.1

Расчет	
Построить граф...	

Figure 1

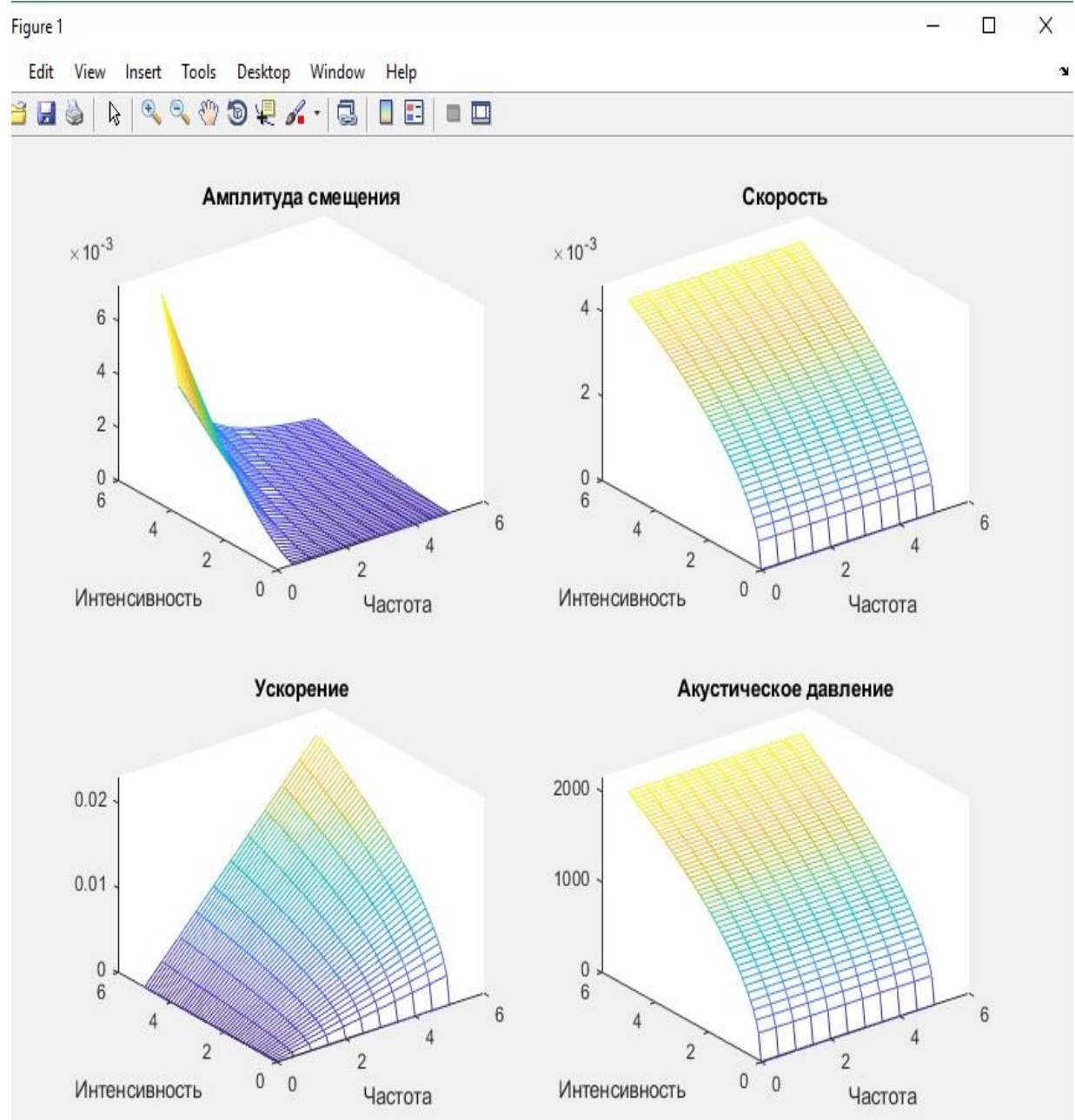
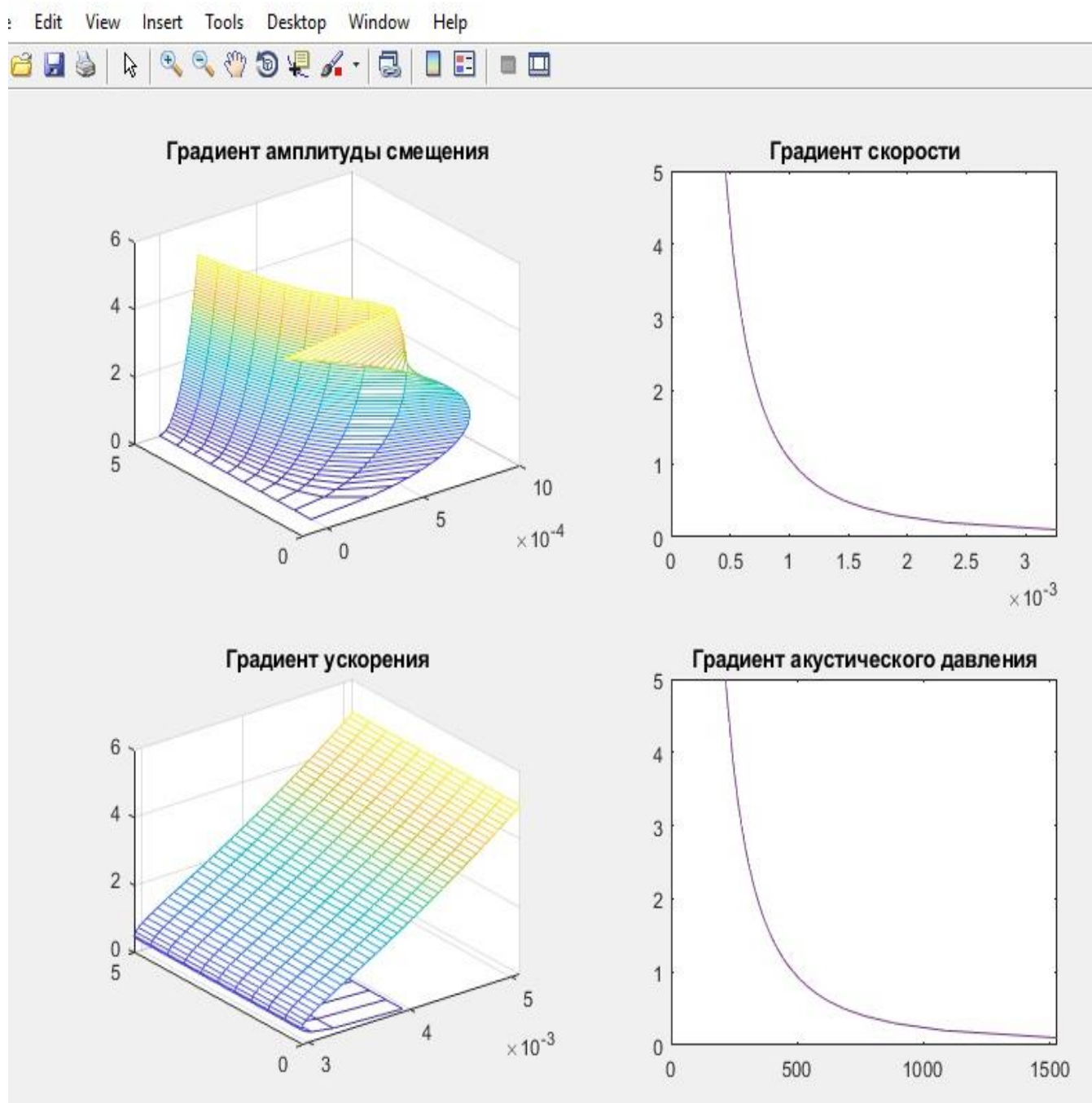


Figure 2

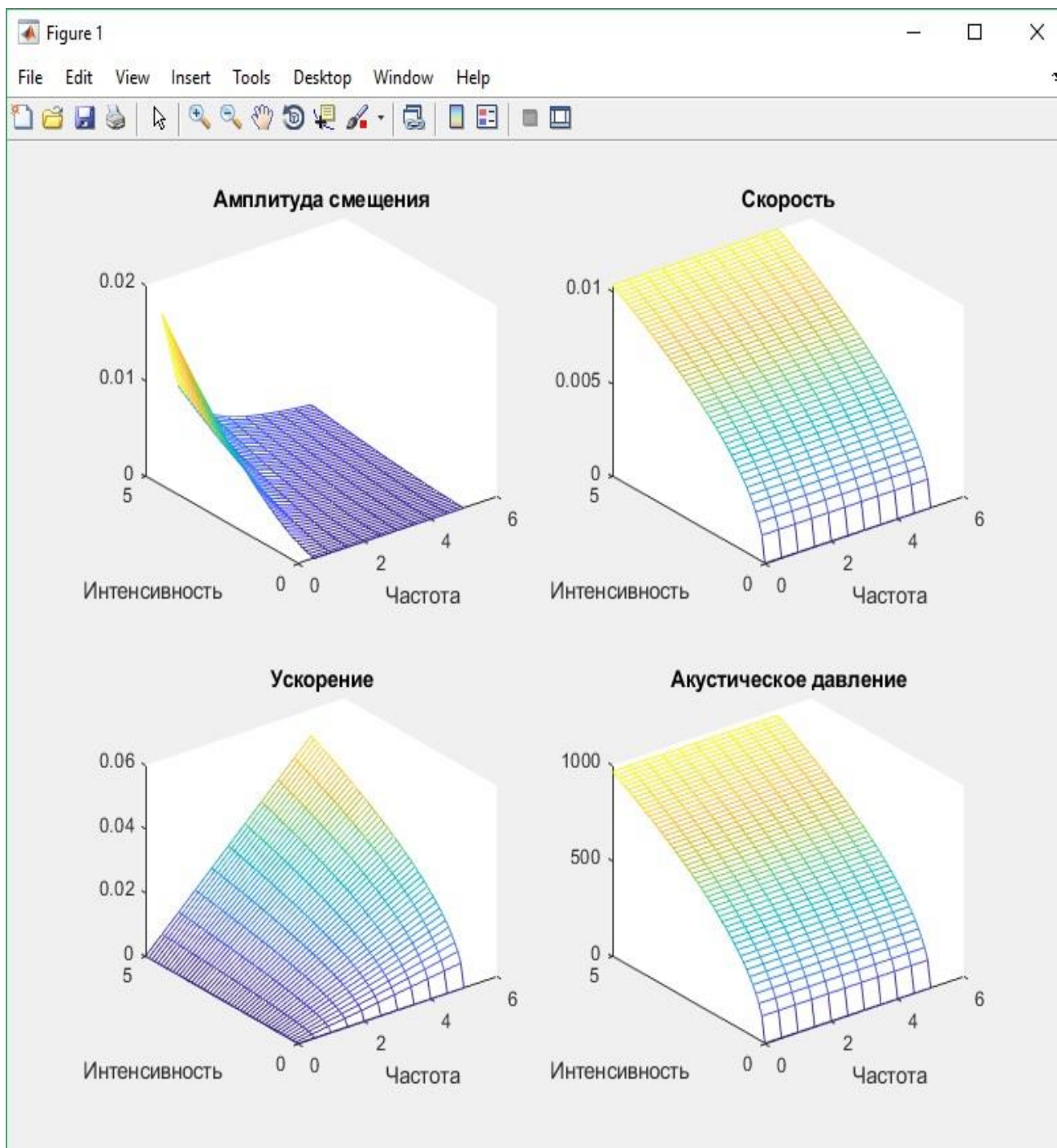


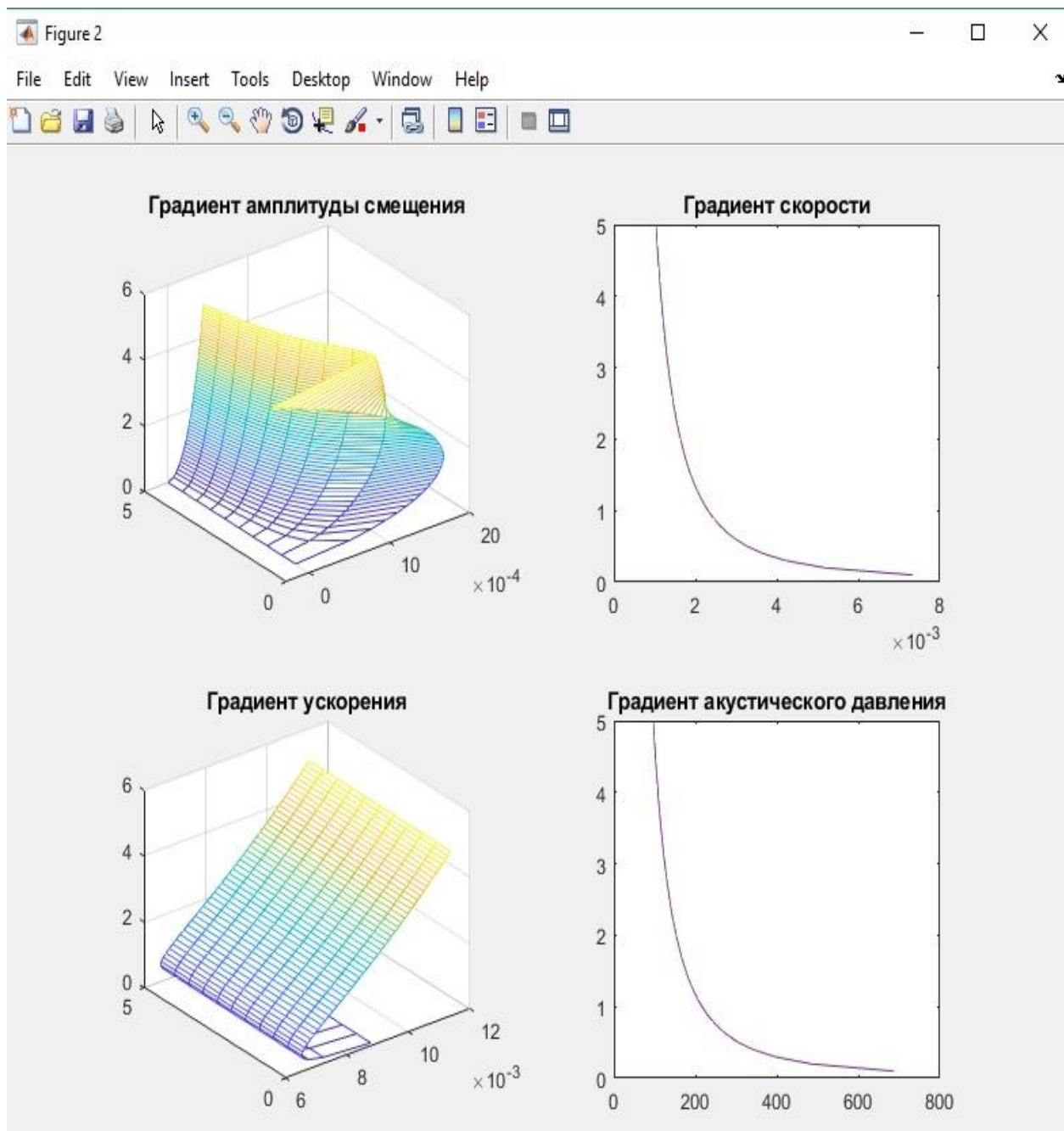
Швидкість - 100 м/с

Входные данные		Расчетные			
c=	<input type="text" value="100"/>	скорость распространения упругой	w=	<input type="text" value="6.28319"/>	угловая
f=	<input type="text" value="1000000"/>	частот	T=	<input type="text" value="1e-06"/>	период
lambda	<input type="text" value="0.015"/>	длина волны	A=	<input type="text" value="0.00073"/>	амплитуда смещения частиц в клетке
rho=	<input type="text" value="936"/>	плотно	vm=	<input type="text" value="0.46225"/>	амплитуда скорости частиц в клетке
eta=	<input type="text" value="0.82E-3"/>	вязкос	a=	<input type="text" value="2.9044e-"/>	амплитуда ускорения частиц в клетке
sigma=	<input type="text" value="73.0E-3"/>	поверхностное	P=	<input type="text" value="43266.6"/>	акустическое давление частиц
I=	<input type="text" value="1E4"/>	интенсивность ультразвуковой			
Dk=	<input type="text" value="5E-4"/>	диаметр			

Построение			
Диапазон частот	начальное	<input type="text" value="0"/>	шаг
	конечное	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="0.5"/>
Диапазон интенсивности волны	начальное	<input type="text" value="0"/>	шаг
	конечное	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="0.1"/>

Расчет	
<input type="button" value="Построить граф..."/>	



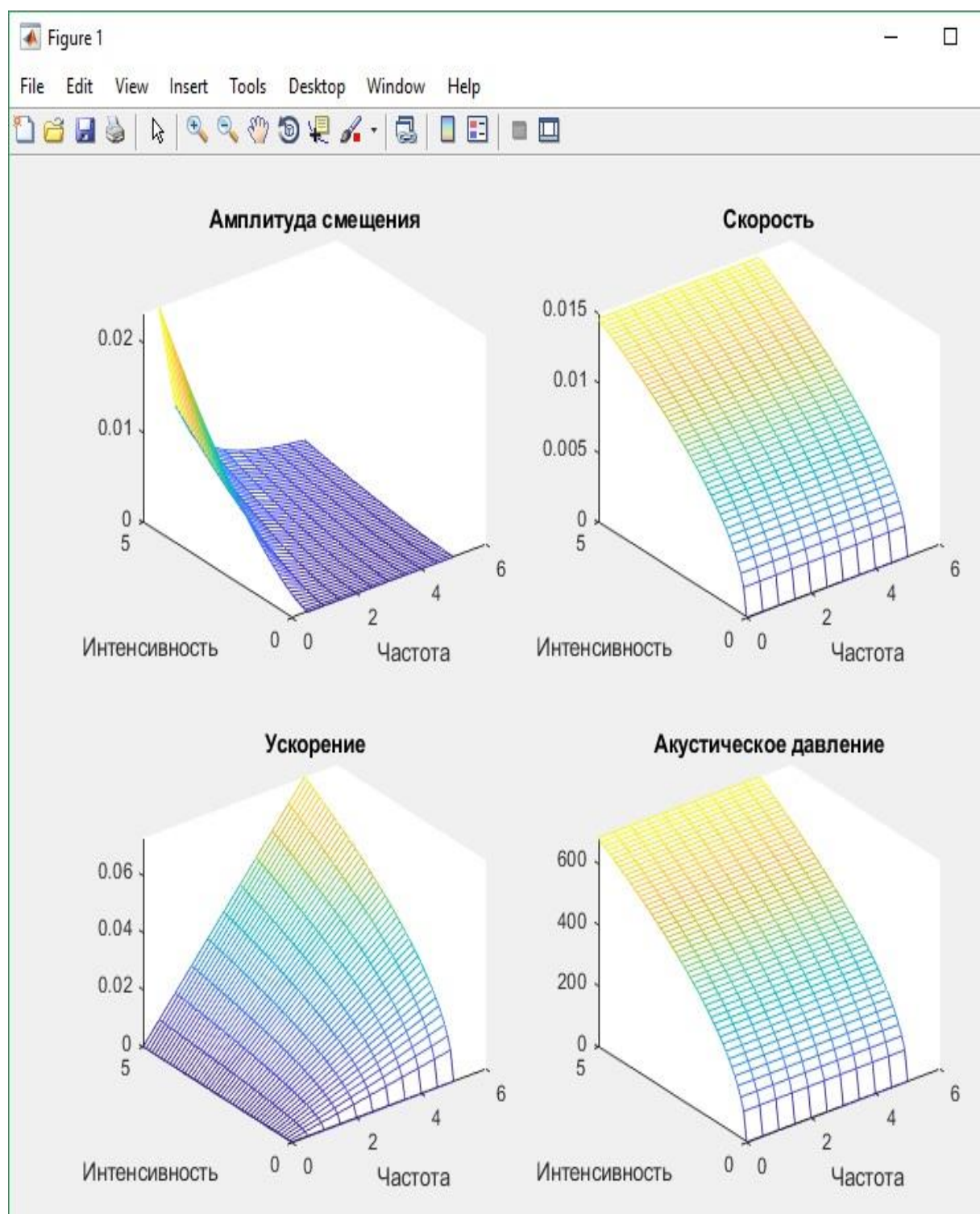


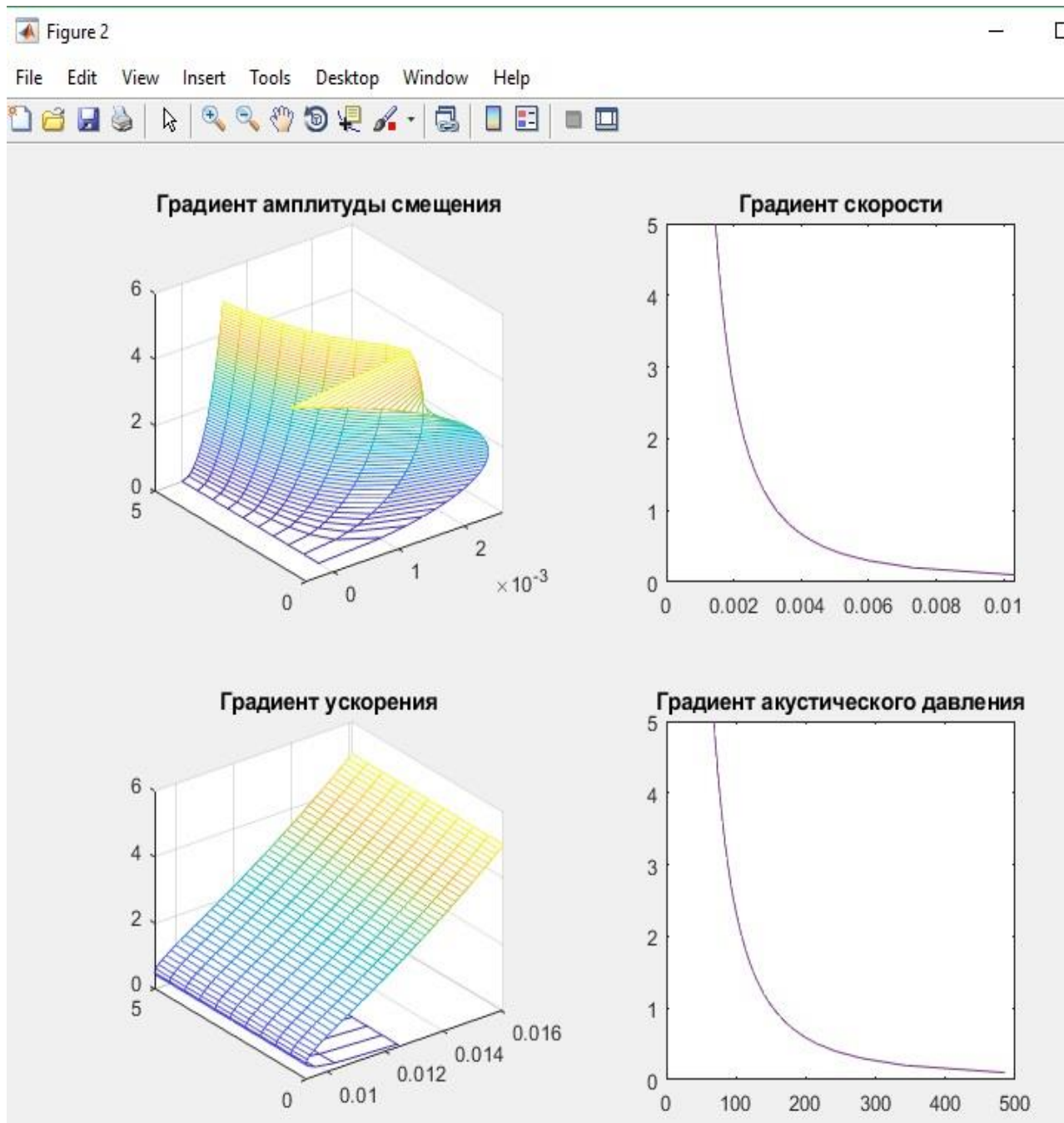
Швидкість - 50 м/с

Входные данные		Расчетные			
c=	<input type="text" value="50"/>	скорость распространения упругой	w=	<input type="text" value="6.28319"/>	угловая
f=	<input type="text" value="1000000"/>	частот	T=	<input type="text" value="1e-06"/>	период
lambda	<input type="text" value="0.015"/>	длина волны	A=	<input type="text" value="0.00104"/>	амплитуда смещения частиц в клетке
rho=	<input type="text" value="936"/>	плотно	vm=	<input type="text" value="0.65372"/>	амплитуда скорости частиц в клетке
eta=	<input type="text" value="0.82E-3"/>	вязкос	a=	<input type="text" value="4.10745"/>	амплитуда ускорения частиц в клетке
sigma=	<input type="text" value="73.0E-3"/>	поверхностное	P=	<input type="text" value="30594.1"/>	акустическое давление частиц
I=	<input type="text" value="1E4"/>	интенсивность ультразвуковой			
Dk=	<input type="text" value="5E-4"/>	диаметр			

Построение			
Диапазон частот	начальное	<input type="text" value="0"/>	шаг
	конечное	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="0.5"/>
Диапазон интенсивности волны	начальное	<input type="text" value="0"/>	шаг
	конечное	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="0.1"/>

<input type="button" value="Расчет"/>	<input type="button" value="Построить граф..."/>
---------------------------------------	--





ДОДАТОК В

ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ХВИЛЬОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ

ПРОГРАМА розрахунку хвильових коефіцієнтів

1. Частотнонезалежна модель

ВОДА

Вихідні
даніШвидкість звуку, м/с $c := 1500, 1499 \dots 30$ Щільність, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $\rho := 1000$ Вязкість, Па $\eta := 0.82 \cdot 10^{-3}$ Поверхневий натяг, $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$ $\sigma := 73.0 \cdot 10^{-3}$ Частота, Гц $f := 22000$ Довжина, м $\lambda := 0.0005$

Розрахунок

1. Кутова швидкість $\omega := 2\pi \cdot f$ $\omega = 1.382 \times 10^5$ 2. $T := \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$ $T = 1 \text{ A}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$

5. Розрахунок хвильових коефіцієнтів

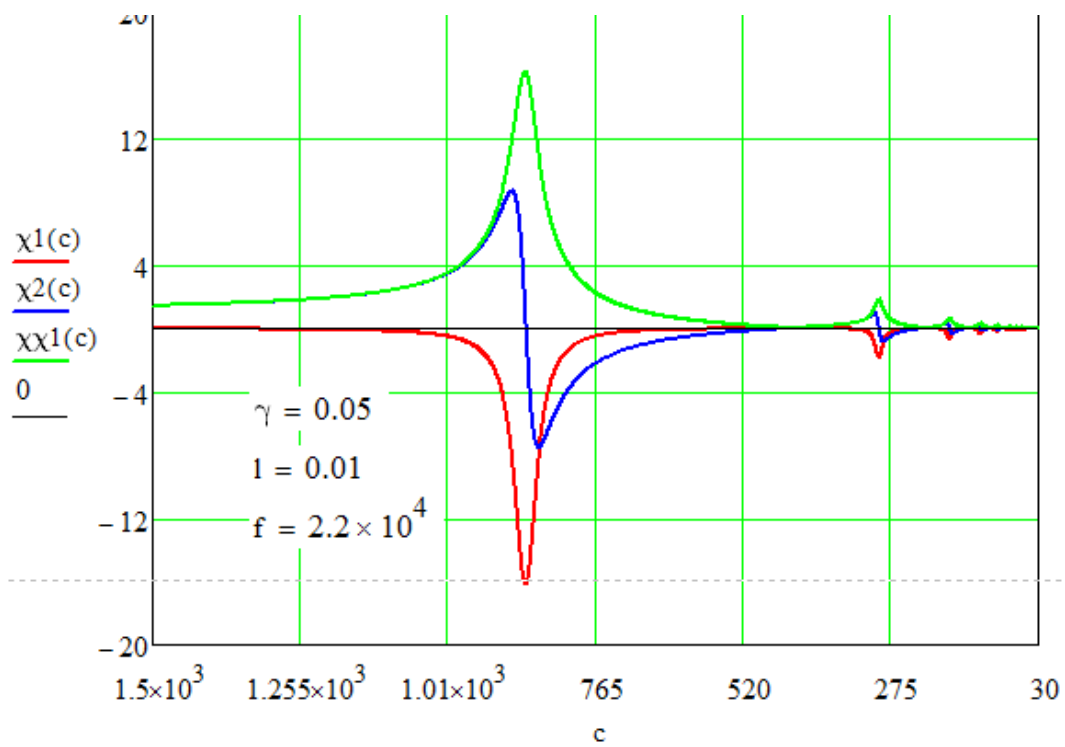
 $\gamma := 0.05$ $\lambda := 0.01$

$$\alpha(c) := \frac{\omega \cdot \gamma}{2 \cdot c} \quad \beta(c) := \frac{\omega}{c}$$

$$5.1 \quad \chi_1(c) := \frac{\alpha(c) \sin(2\beta(c) \cdot l) - \beta(c) \sinh(2\alpha(c) \cdot l)}{1 \cdot (\alpha(c)^2 + \beta(c)^2) \cdot (\cosh(2\alpha(c) \cdot l) + \cos(2\beta(c) \cdot l))}$$

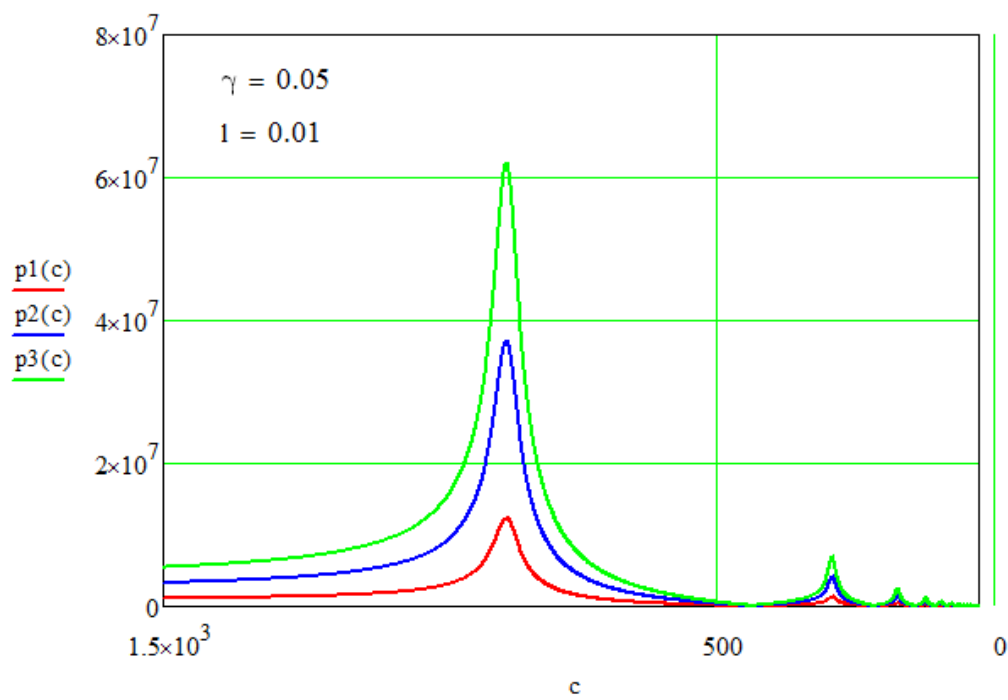
$$5.2 \quad \chi_2(c) := \frac{\alpha(c) \sinh(2\alpha(c) \cdot l) + \beta(c) \sin(2\beta(c) \cdot l)}{1 \cdot (\alpha(c)^2 + \beta(c)^2) \cdot (\cosh(2\alpha(c) \cdot l) + \cos(2\beta(c) \cdot l))}$$

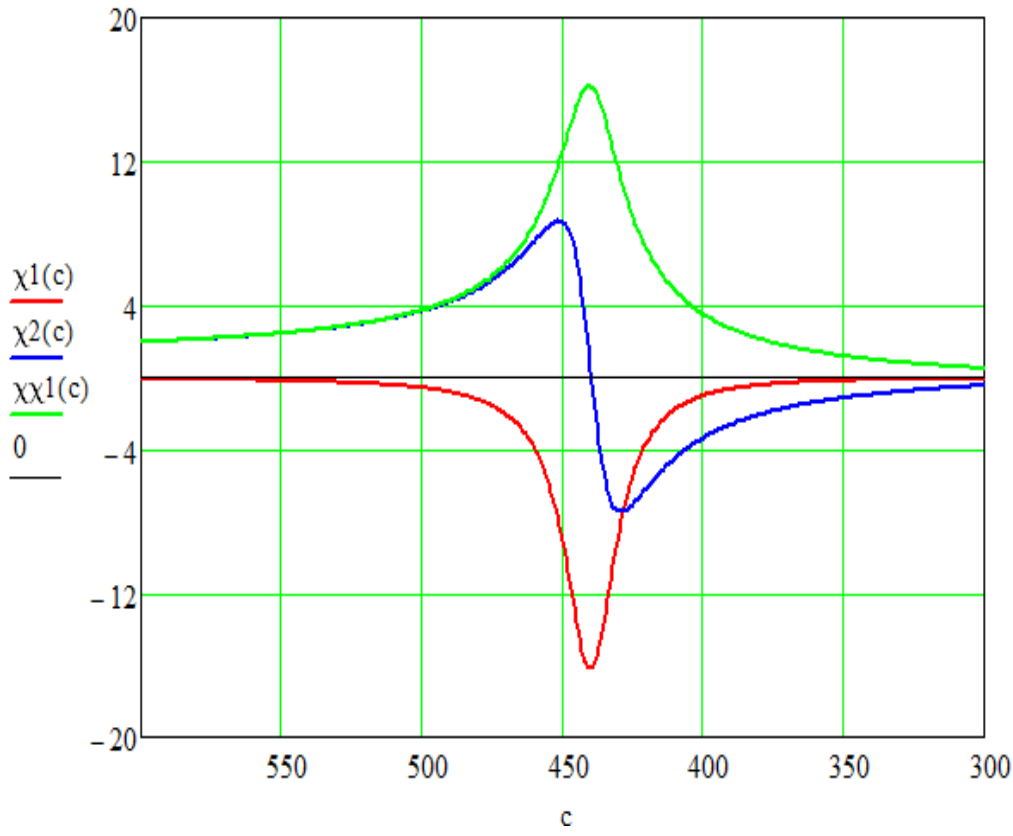
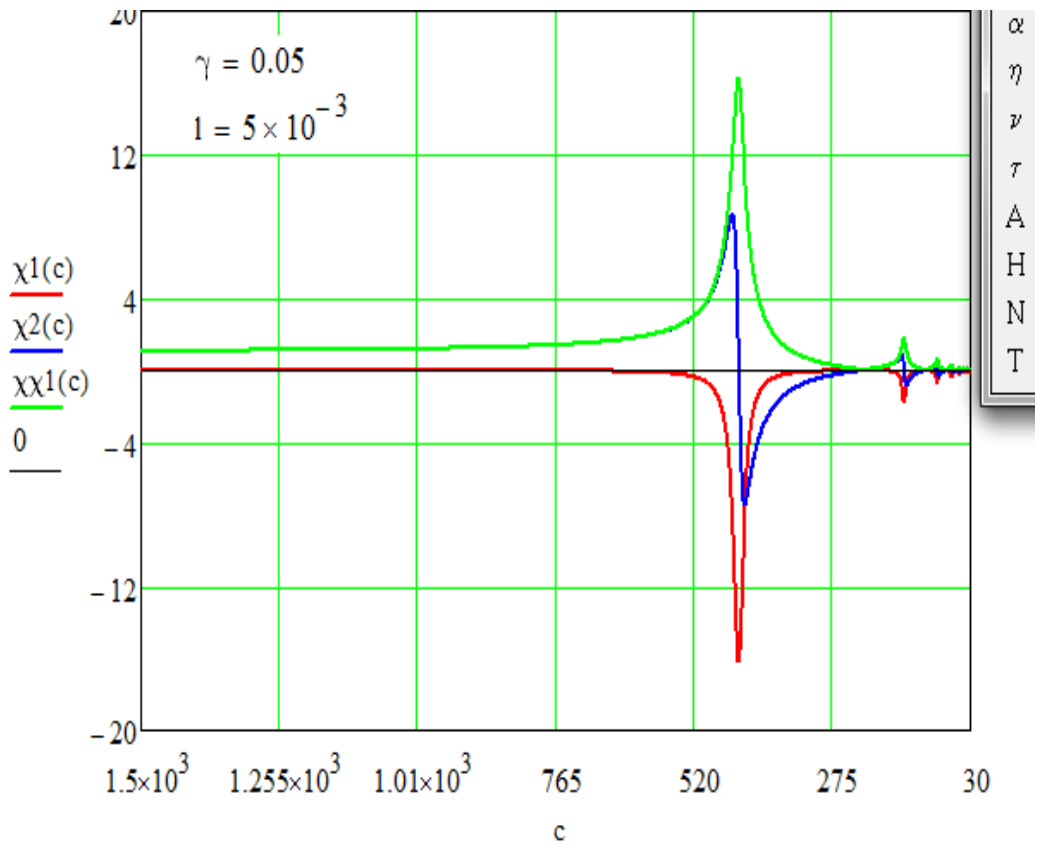
$$5.3 \quad \chi\chi_1(c) := \sqrt{\chi_1(c)^2 + \chi_2(c)^2}$$



6. Контактний тиск

Амплітуда, м $A1 := 4 \cdot 10^{-6}$ $A2 := 12 \cdot 10^{-6}$ $A3 := 20 \cdot 10^{-6}$
 $p1(c) := \rho \cdot l \cdot A1 \cdot \omega^2 \cdot \chi_1(c)$ $p2(c) := \rho \cdot l \cdot A2 \cdot \omega^2 \cdot \chi_1(c)$ $p3(c) := \rho \cdot l \cdot A3 \cdot \omega^2 \cdot \chi_1(c)$





мплітуда, м

$$A1 := 4 \cdot 10^{-6}$$

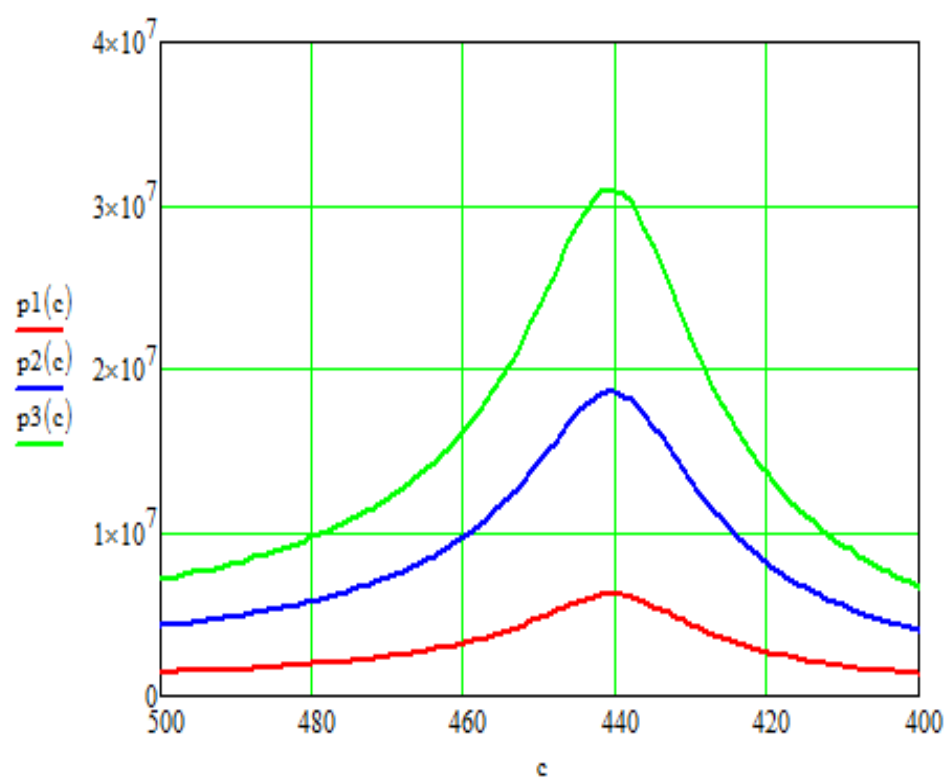
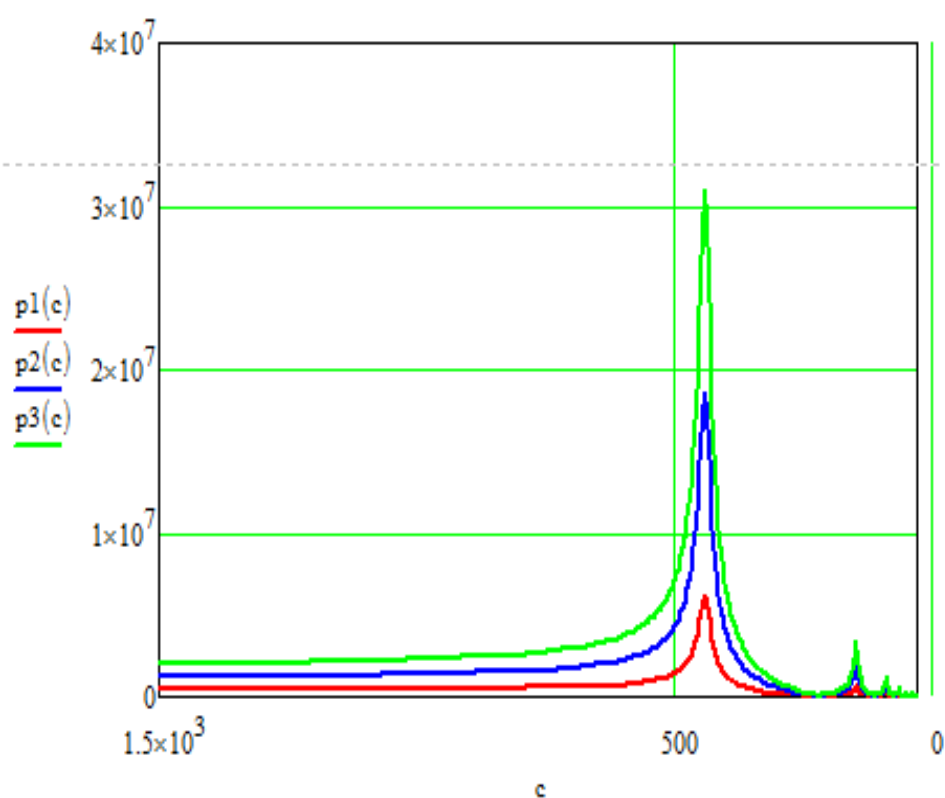
$$A2 := 12 \cdot 10^{-6}$$

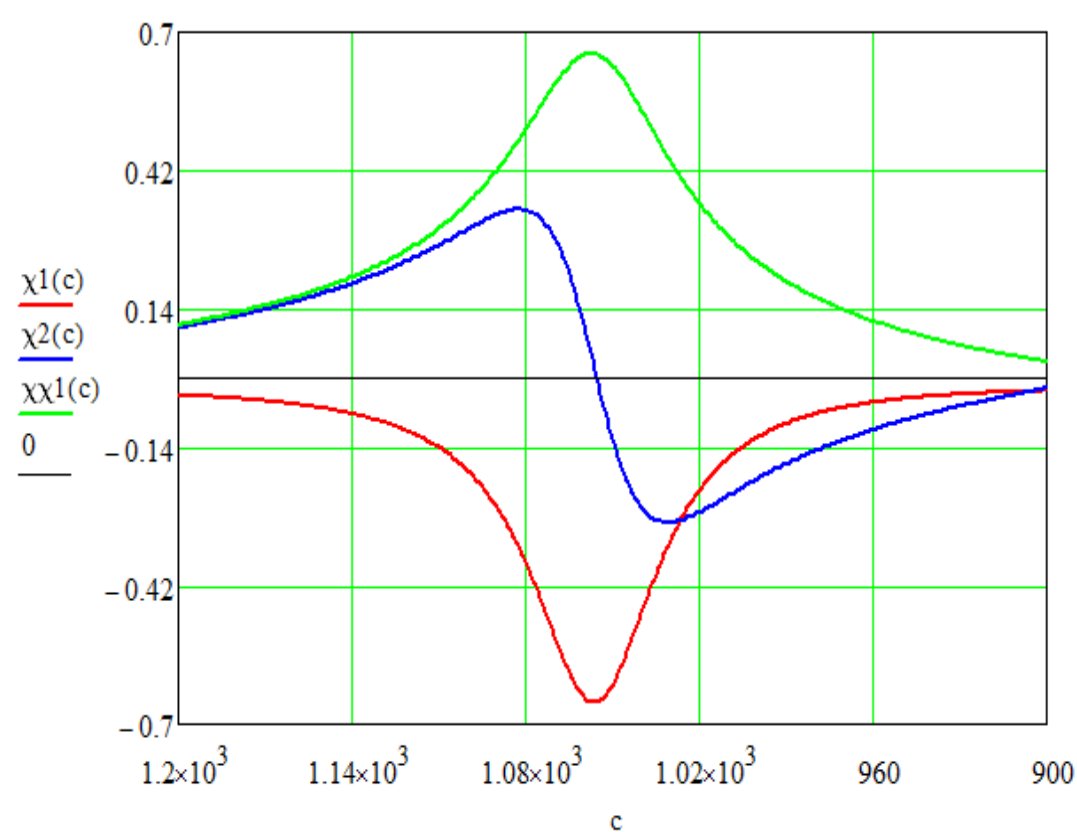
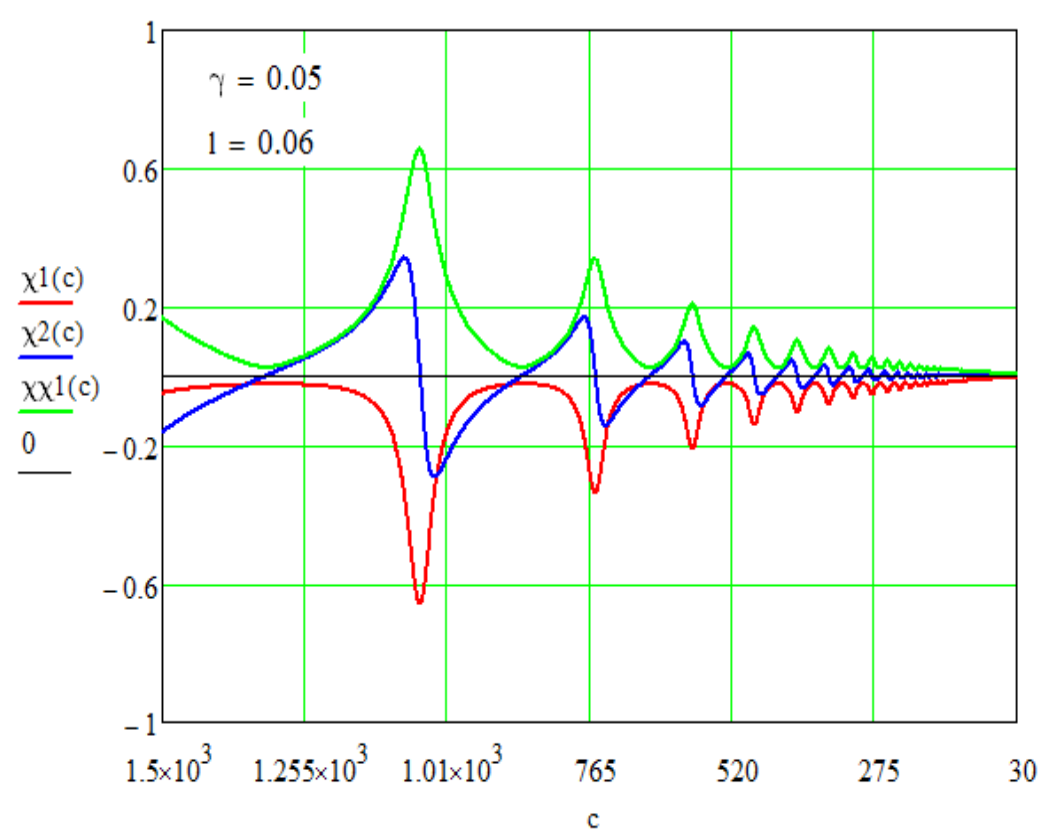
$$A3 := 20 \cdot 10^{-6}$$

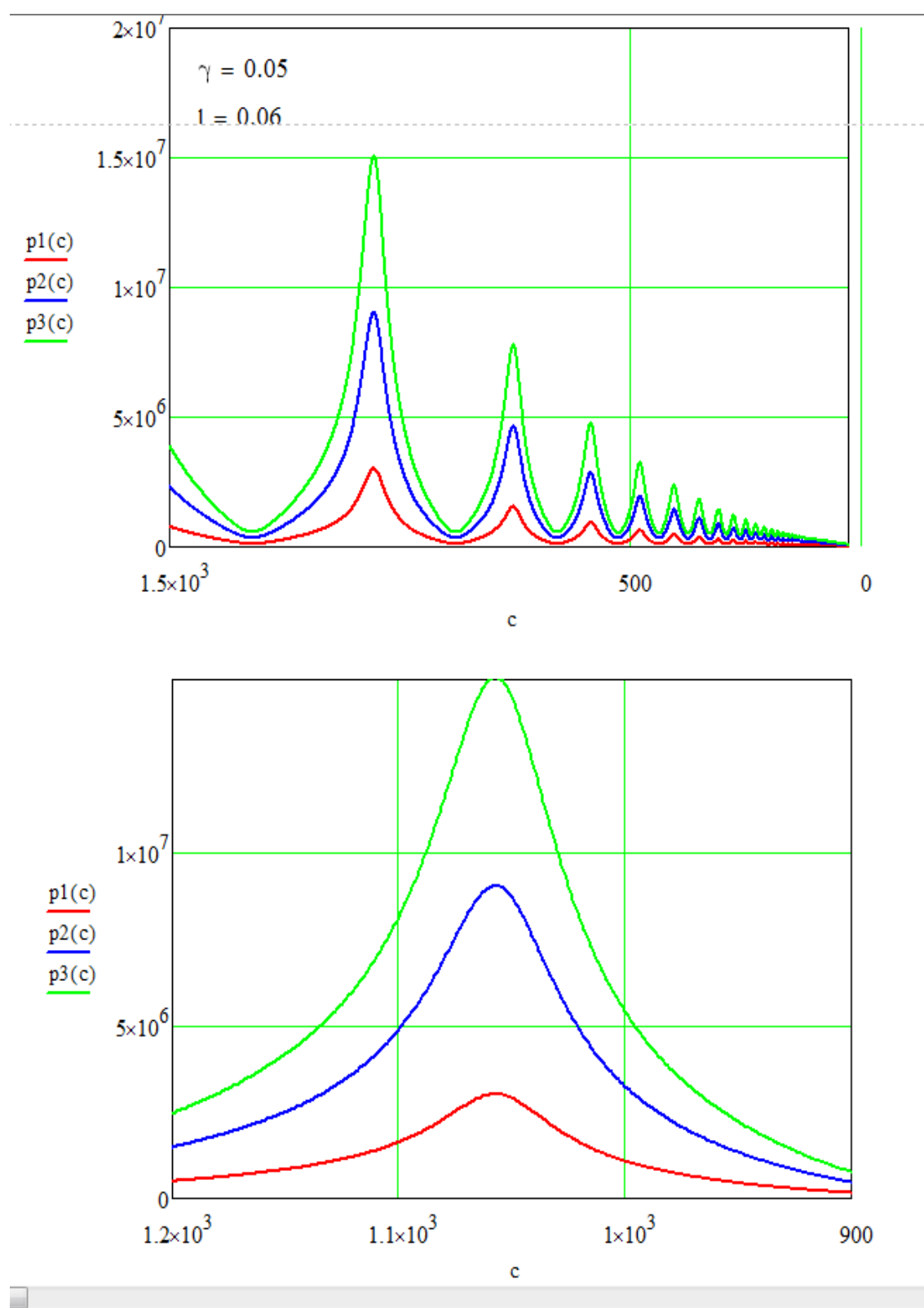
$$p1(c) := \rho \cdot A1 \cdot \omega^2 \cdot \chi\chi1(c)$$

$$p2(c) := \rho \cdot A2 \cdot \omega^2 \cdot \chi\chi1(c)$$

$$p3(c) := \rho \cdot A3 \cdot \omega^2 \cdot \chi\chi1(c)$$







ДОДАТОК Г**ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

проф. Віталій ПАСІЧНИК

2020 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Агрохім Групп»



Олексій Грабар

2020 р.

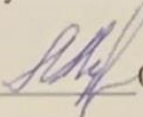
АКТ

впровадження результатів науково-технічної розробки,
виконаної в Національному технічному університеті України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

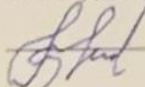
Колективом співробітників НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» під науковим керівництвом завідувача кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки д.т.н., професора Луговського О.Ф. при безпосередній участі докторантів кафедри Берник Ірини Миколаївни та Мовчанюка Андрія Валерійовича виконана науково-технічна розробка «Ультразвуковий мехатронний кавітаційний апарат з системою керування». Розробка впроваджена на підприємстві ТОВ «Агрохім Групп» в технологічному процесі виробництва гумінового добрива для потреб сільського господарства. Розроблене кавітаційне технологічне обладнання забезпечує в технологічному процесі екстрагування та гомогенізацію дисперсного рідкого середовища. У впровадженій розробці використані результати науково-дослідної роботи докторантів Берник І.М. та Мовчанюка А.В. Впроваджене на підприємстві експериментальне ультразвукове кавітаційне обладнання забезпечило суттєве підвищення якості багатокомпонентного рідкого добрива для потреб сільського господарства.

Цей Акт не є підставою щодо взаємних фінансових розрахунків.

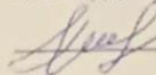
Від КПІ ім. Ігоря Сікорського:
науковий консультант, д.т.н., проф.

 О.Ф. Луговський

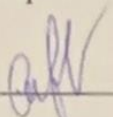
к.т.н., доцент

 І.М. Берник

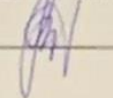
к.т.н., доцент

 А.В. Мовчанюк

Від ТОВ «Агрохім Групп»
директор

 О.М. Грабар

головний інженер

 А.О. Ротта



З А Т В Е Р Д Ж У Ю

Директор з наукової роботи
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

проф. Віталій ПАСІЧНИК

2020 р.

З А Т В Е Р Д Ж У Ю

Директор
ООО «Компанія «Джала Голд»

Василь Іванченко

2020 р.

АКТ

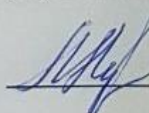
впровадження результатів науково-технічної розробки,
виконаної в Національному технічному університеті України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Колективом співробітників НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» під науковим керівництвом завідувача кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки д.т.н., професора Луговського О.Ф. при безпосередній участі докторантів кафедри Берник Ірини Миколаївни та Мовчанюка Андрія Валерійовича виконана науково-технічна розробка «Ультразвуковий кавітаційний знезаражувач – гомогенізатор – дегазатор». Розробка впроваджена на підприємстві ООО «Компанія «Джала Голд» в технологічному процесі виробництва рідких азотних та комплексних добрив для потреб сільського господарства. В основу розробки покладені результати наукових досліджень в області створення ультразвукових кавітаційних апаратів для реалізації кавітаційних технологій в промисловості, медицині та сільському господарстві, виконаних докторантами Берник І.М. та Мовчанюком А.В. Виготовлене розробниками експериментальне ультразвукове кавітаційне обладнання забезпечило якісну на молекулярному рівні гомогенізацію багатокомпонентного рідкого добрива.

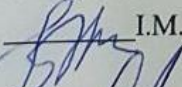
Впроваджене ультразвукове технологічне обладнання за технологічністю, надійністю та ефективністю суттєво відрізняється від відомих світових аналогів.

Цей Акт не є підставою щодо взаємних фінансових розрахунків.

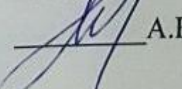
Від КПІ ім. Ігоря Сікорського:
науковий консультант, д.т.н., проф.

 О.Ф. Луговський

К.Т.Н., доцент

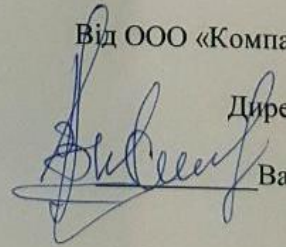
 І.М. Берник

К.Т.Н., доцент

 А.В. Мовчанюк

Від ООО «Компанія «Джала Голд»

Директор

 Василь Іванченко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Генеральний директор
 ПАТ «Дрогобицький завод
 автомобільних кранів»
 Букрєєв І. І.
 «23» 05 2017

82100, Львівська обл., м. Дрогобич,
 вул. Гайдамацька, 22

АКТ

про промислове впровадження наукової розробки

Комісія у складі представників ПАТ «Дрогобицький завод автомобільних кранів» технічний директор Якимів М. В. та головний технолог Пакош Т. Й. та Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» кафедри прикладної гідроаеромеханіки і мехатроніки завідувача, д.т.н., професора Луговського О.Ф., к.т.н., докторанта Мовчанюка А.В. та к.т.н., доцента Гришка І. А. в травні 2017 року провела промислове впровадження ультразвукового кавітаційного технологічного обладнання для регенерації мастильно-охолоджуючих рідин, які використовують при операціях металообробки на машинобудівних підприємствах. Запропоноване обладнання було розроблено при виконанні наукових досліджень докторанта Мовчанюка А.В. Наукове консультування здійснював професор Луговський О.Ф.

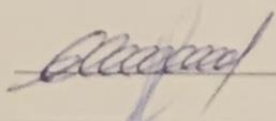
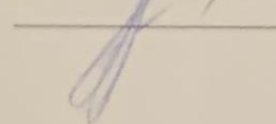
Регенерацію мастильно-охолоджуючих рідин реалізовано за використання ультразвукового технологічного апарату. Подовження термінів використання мастильно-охолоджуючих рідин можливо шляхом монтажу в систему циркуляції проточного кавітаційного обладнання. Пристрій містить

проточну камеру, ультразвуковий генератор та систему керування.

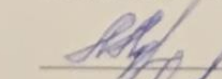

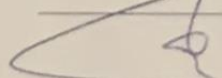
При проведенні випробувань встановлено, що кавітаційна обробка паливно-мастильних рідин, забезпечує інактивацію мікрофлори, видалення неприємних запахів та відновлення кольору.

Результати випробувань свідчать про доцільність практичного використання ультразвукового технологічного обладнання.

Представники ПАТ «Дрогобицький
завод автомобільних кранів»

 Якимів М. В.
 Пакош Т. Й.

Представники НТУУ
«КПІ ім. І. Сікорського»

 О.Ф. Лутовський
 А.В. Мовчанюк
 І.А. Гришко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ПП «Кондитерський дім
 «Санкруа» _____ Р.В. Бурко
 «19» липня 2017
 21017 м. Вінниця, вул. Гонти 28а

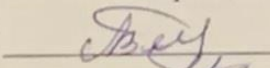
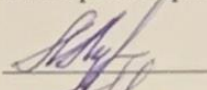
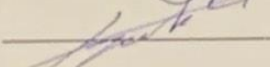
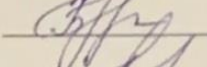
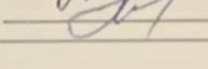
АКТ
 про промислове впровадження наукової розробки

Ми, що нижче підписалися, представники підприємства ПП «Кондитерський дім «Санкруа» – головний технолог Павлівська Г. В. та головний інженер Бурко Р.В. з однієї сторони і представники Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» – завідувач кафедри прикладної гідроаеромеханіки і мехатроніки, д.т.н., професор Луговський О.Ф., к.т.н., докторант Берник І.М. та к.т.н., докторант Мовчанюк А.В. з другої сторони, склали даний акт про те, що у період з 17 по 19 липня 2017 року на підприємстві ПП «Кондитерський дім «Санкруа» були проведені промислові випробування способу та технологічного обладнання для активації хлібопекарських дріжджів в ультразвуковому полі при виробництві хлібобулочної продукції. Вказані технологія та обладнання були розроблені при виконанні наукових досліджень докторантів Берник І.М та Мовчанюка А.В. Наукове консультування здійснював професор Луговський О.Ф.

Отриманні результати промислового випробування, у порівнянні з існуючими технологією та обладнанням, підтверджують достатньо високу ефективність, представленої науковцями розробки.

Внаслідок впровадження наукової розробки докторантів було реалізовано процес активації дріжджів за рахунок підвищення фізіологічної активності дріжджових клітин; підвищується мальтозна активність та покращується підйомна сила. Промислові експерименти дозволили встановити раціональні режими роботи ультразвукового технологічного обладнання. Отримані хлібобулочні вироби відповідають високим стандартам якості.

Акт не є підставою для проведення взаємних фінансових розрахунків.

Головні спеціалісти ПП «Кондитерський дім «Санкруа»:	Представники НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
 Г. В. Павлівська	 О.Ф. Луговський
 Р.В. Бурко	 І.М. Берник
	 А.В. Мовчанюк

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор з якості

ТОВ «Люстдорф»

Бобкова М. Г.

«23» серпня 2018

22700, Вінницька обл.,

м. Іллінці,

вул. Коцюбинського, 1

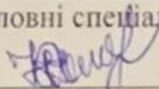
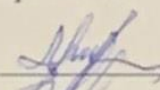
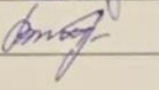
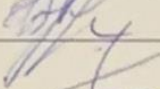

АКТ

про промислове впровадження наукової розробки

Ми, що нижче підписалися, представники підприємства ТОВ «Люстдорф» - головний технолог Поліщук Л.В. та головний інженер Доценко Ю. М. з однієї сторони і представники Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» – завідувач кафедри прикладної гідроаеромеханіки і мехатроніки, д.т.н., професор Луговський О.Ф., к.т.н., докторант Берник І.М. та к.т.н., доцент Гришко І.А. з другої сторони, склали даний акт про те, що у період з 20 по 22 серпня 2018 року на підприємстві ТОВ «Люстдорф» були проведені промислові випробування способу та технологічного обладнання для підвищення активності мікрофлори закваски в ультразвуковому полі при виробництві молочної продукції. Вказані технологія та обладнання були розроблені при виконанні наукових досліджень докторанта Берник І.М. Наукове консультування здійснював професор Луговський О.Ф.

Отриманні результати промислового випробування, у порівнянні з існуючими технологією та обладнанням, підтверджують достатньо високу ефективність, представлені науковцями розробки. В наслідок впровадження наукової розробки була підвищена активність закваски за рахунок значного зростання обмінних процесів у клітинах та проникності цитоплазми. Промислові експерименти дозволили встановити раціональні режими роботи ультразвукового технологічного обладнання. Отримані молочні продукти відповідають високим стандартам якості.

Акт не є підставою для проведення взаємних фінансових розрахунків.

Головні спеціалісти ТОВ «Люстдорф»:	Представники НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
 Доценко Ю. М.	 О.Ф. Луговський
 Поліщук Л. В.	 І.М. Берник
	 І.А. Гришко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Національного технічного

університету України

«Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського»

акад. НАН України, д.т.н., проф.



Юрій ЯКИМЕНКО

"15" 12 2020 р.

А К Т

про впровадження результатів науково-дослідної роботи,
виконаної згідно теми «Наукові основи вдосконалення технології і обладнання
ультразвукової обробки дисперсних середовищ»
у навчальний процес кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Даним актом підтверджується, що отримані Берник Іриною Миколаївною
результати наукової роботи по вдосконаленню технології і обладнання
ультразвукової обробки дисперсних середовищ використані в навчальному
процесі підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 131 – прикладна
механіка при викладанні наступних дисциплін:

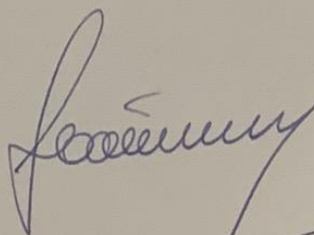
- в курсі «Основи електрогідроавтоматики мехатронних систем»
використані розділи, що стосуються принципів побудови високоефективних
ультразвукових кавітаційних пристроїв для обробки дисперсних технологічних
середовищ;

- в курсі «Основи гідроавтоматики» використаний розділ, що стосується
теоретичного та експериментального дослідження ультразвукової кавітації;

- в курсі «Гідроавтоматика і керування» застосовані математичні моделі
розповсюдження ультразвукових коливань в обмежених об'ємах
ультразвукових кавітаційних камер.

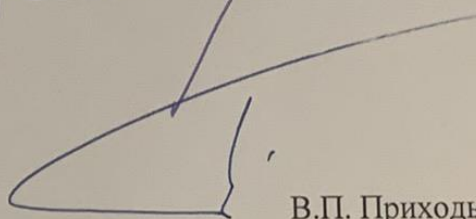
Використання результатів виконаних наукових досліджень дозволило розширити тематику навчального матеріалу зазначених курсів та створило умови для практичного засвоєння сучасних досягнень в напрямку конструкцій сучасних ультразвукових кавітаційних апаратів, забезпечення високої їх продуктивності з мінімізацією енерговитрат, вирішувати проблеми встановлення раціональних технологічних режимів та створення передумов керування роботою акустичних перетворювачів.

Директор ММІ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
д.т.н., проф.



М.І. Бобир

секретар Вченої Ради
КПІ ім. Ігоря Сікорського
к.т.н., доц.



В.П. Приходько